



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



VITÓRIA CRISTINA ALVES

**DESENVOLVIMENTO DE UMA MATRIZ *CLINCH* COM GEOMETRIA
OTIMIZADA PARA AUMENTO DA RIGIDEZ LOCAL EM UNIÃO DE
CHAPAS METÁLICAS**

Ouro Preto - MG
2026

VITÓRIA CRISTINA ALVES

**DESENVOLVIMENTO DE UMA MATRIZ *CLINCH* COM GEOMETRIA
OTIMIZADA PARA AUMENTO DA RIGIDEZ LOCAL EM UNIÃO DE
CHAPAS METÁLICAS**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do título
de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Dr. Diogo Antônio de Sousa

**Ouro Preto – MG
2026**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A474d Alves, Vitoria Cristina.

Desenvolvimento de uma matriz clinch com geometria otimizada para aumento de rigidez local em união de chapas metálicas. [manuscrito] / Vitoria Cristina Alves. - 2026.

64 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Diogo Antônio Sousa.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Anéis de retenção. 2. Deformações (Mecânica) - Clinching - Junção. 3. Processos de fabricação - Ferramentas - Matriz. 4. Processos de fabricação - Ferramentas - Punção. I. Sousa, Diogo Antônio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Vitória Cristina Alves

Desenvolvimento de uma matriz *clinch* com geometria otimizada para aumento da rigidez local em união de chapas metálicas

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovada em 16 de julho de 2026

Membros da banca

DSc. Diogo Antônio de Sousa - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Washington Luis Vieira da Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. Sávio Sade Tayer (Universidade Federal de Ouro Preto)

Diogo Antônio de Sousa, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/07/2026, às 16:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1146332** e o código CRC **A56AC130**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.008190/2026-48

SEI nº 1146332

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: (31)3559-1533 - www.ufop.br

A Deus, dedico mais esta etapa vencida,
aos meus pais, pelo apoio incondicional.

A instituição que contribuiu para a
minha formação.

A todos que participaram indiretamente
ou diretamente, deixo o meu
reconhecimento.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por me guiar e capacitar durante toda a trajetória do curso, sendo meu companheiro em toda essa caminhada que me trouxe muitos desafios e conquistas.

Aos meus pais, que nunca mediram esforços para que meus sonhos se realizassem. Mesmo de longe, nunca soltaram minha mão e sempre comemoraram cada uma das minhas conquistas e ofereceram todo o suporte de que eu precisava.

À minha irmã, que sempre foi meu apoio e minha melhor amiga, obrigada por estar ao meu lado nos momentos de alegria e nos mais difíceis. Você foi essencial para tudo isso.

Ao meu orientador e amigo Diogo Antônio de Sousa, pelo apoio, dedicação e confiança. Sua orientação foi essencial para transformar uma simples ideia em algo real.

À professora Margarida Fernandes pelo apoio institucional e pela disponibilidade do laboratório LABPREP (Laboratório de Preparação de Amostras) e LABCAR (Laboratório de Caracterização de Amostras), recursos indispensáveis para a realização deste estudo, e ao técnico Marconi, pelo acompanhamento e auxílio na realização das imagens, e ao Laboratório de Saneamento Básico (DECIV), pela disponibilização do estereoscópio.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Minas, por todos os ensinamentos compartilhados durante minha formação. Vocês foram muito importantes na minha trajetória como engenheira. Muito obrigada.

Aos meus familiares — avós, primos, tios — obrigada por sempre estarem na torcida e pelas orações, que me deram forças.

Aos meus amigos, em especial Geisyane, Matheus Pires, Lucas e Isabella de Souza, a ajuda e apoio de vocês foram fundamentais para melhorar e evoluir este trabalho. Ao Simon Bernbeck por todo companheirismo e suporte.

À República Hipnose, que foi minha casa e meu refúgio, onde os risos e as conversas me fizeram descansar quando a mente precisava relaxar.

E um sincero muito obrigada a mim mesma, por ter persistido e não desistido nos momentos mais complicados e difíceis. Essa vitória também pertence à pessoa que eu me tornei ao longo dessa caminhada.

*"Se uma pessoa não falha de vez
em quando, então ela não desafiou
a si mesma."*

- Ferdinand Porsche

RESUMO

A união de chapas metálicas é uma etapa fundamental em diversos processos de fabricação na indústria automotiva, sendo a soldagem por resistência elétrica a ponto um dos métodos mais empregados para essa finalidade. Esse processo, contudo, apresenta limitações relevantes, como a formação de zona termicamente afetada, o amolecimento localizado do material e a redução da resistência à fadiga da união, o que tem motivado a busca por processos alternativos capazes de preservar as propriedades mecânicas das chapas unidas. Nesse contexto, o processo de união por *clinch* surge como uma alternativa que dispensa a aplicação de calor, promovendo a união mecânica das chapas por meio de deformação plástica localizada a frio. O presente trabalho consiste em um estudo experimental que tem como objetivo geral desenvolver uma matriz para o processo de união por *clinch*, com geometria otimizada, de modo a contribuir para o aumento da rigidez estrutural local das uniões formadas entre chapas metálicas. Especificamente, busca-se desenvolver uma matriz sem a utilização de anel de retenção, promovendo a formação de nervuras de reforço em torno do ponto de união e avaliar a resistência mecânica da junta por meio de ensaio de arrancamento. A pesquisa caracteriza-se como bibliográfica, experimental e exploratória, sendo desenvolvidos uma matriz e um punção em aço SAE 4140, cuja geometria foi definida a partir de parâmetros de folga, profundidade e espessura de fundo indicados na literatura. As chapas de aço SAE 1015 foram unidas por meio do conjunto punção-matriz, com a força de conformação aplicada por uma prensa hidráulica, e as juntas obtidas foram caracterizadas por meio de análise macrográfica e de ensaio de arrancamento cruzado, realizado em máquina universal de ensaios. Os resultados indicam que a matriz desenvolvida possibilita a produção de uniões sem a necessidade de anel de retenção, com a formação de uma nervura estrutural ao redor do ponto conformado, associada a um possível ganho de rigidez local das chapas. Nos ensaios de arrancamento cruzado, observaram-se cargas máximas entre 1,4 kN e 1,9 kN, valores compatíveis com os reportados na literatura para juntas de características semelhantes, enquanto a análise macrográfica evidenciou a formação de cavidade côncava e de intertravamento mecânico entre as chapas, indicando escoamento plástico adequado do material durante a conformação. Conclui-se que a matriz desenvolvida, com a remoção do anel de retenção, apresenta potencial para contribuir com o aumento da rigidez local das uniões por *clinch*. Conclui-se que a matriz desenvolvida, com a remoção do anel de retenção, apresenta potencial para contribuir com o aumento da rigidez local das uniões por *clinch*, sendo essa rigidez proveniente da nervura estrutural formada após a deformação do material durante o processo de conformação na matriz otimizada.

Palavras-chave: Arrancamento. Anel de retenção. Conformação mecânica. *Clinching*. Deformação Mecânica. Geometria. Junção. Matriz. Macrografia. Punção.

ABSTRACT

The joining of metal sheets is a fundamental step in various manufacturing processes in the automotive industry, with resistance spot welding being one of the most widely used methods for this purpose. This process, however, presents relevant limitations, such as the formation of a heat-affected zone, localized softening of the material, and reduced fatigue resistance of the joint, which has motivated the search for alternative processes capable of preserving the mechanical properties of the joined sheets. In this context, the clinching process emerges as an alternative that dispenses with the application of heat, promoting the mechanical joining of sheets through localized cold plastic deformation. This work consists of an experimental study whose general objective is to develop a die for the clinching process, with optimized geometry, in order to contribute to increasing the local structural stiffness of joints formed between metal sheets. Specifically, it aims to develop a die without the use of a blank holder, promoting the formation of reinforcement ribs around the joining point, and to evaluate the mechanical strength of the joint through a peel test. The research is characterized as bibliographic, experimental, and exploratory, with a die and a punch developed in SAE 4140 steel, whose geometry was defined based on clearance, depth, and bottom thickness parameters indicated in the literature. SAE 1015 steel sheets were joined using the punch-die assembly, with the forming force applied by a hydraulic press, and the resulting joints were characterized through macrographic analysis and cross-tension testing, performed on a universal testing machine. The results indicate that the developed die enables the production of joints without the need for a blank holder, with the formation of a structural rib around the formed point, associated with a possible increase in local stiffness of the sheets. In the cross-tension tests, maximum loads between 1.4 kN and 1.9 kN were observed, values compatible with those reported in the literature for joints with similar characteristics, while the macrographic analysis evidenced the formation of a concave cavity and mechanical interlocking between the sheets, indicating adequate plastic flow of the material during forming. It is concluded that the developed die, with the removal of the blank holder, presents potential to contribute to the increase in local stiffness of clinching joints. It can be concluded that the developed die, with the removal of the blank holder, has the potential to increase the local stiffness of clinched joints, with this stiffness resulting from the structural rib formed by the material deformation during the forming process in the optimized die.

Keywords: Blank holder. Clinching. Die. Geometry. Joining Peel test. Macrography. Mechanical forming. Mechanical deformation. . Punch.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Formação do ponto de solda	8
Figura 2: Processo <i>clinch</i>	9
Figura 3: Processo <i>Clinch</i>	10
Figura 4: <i>Clinching</i> sem cisalhamento	11
Figura 5: Ensaio de Arrancamento	12
Figura 6: Características geométricas de uma união por <i>clinch</i>	13
Figura 7: Fluxograma das etapas da metodologia e métodos.....	17
Figura 8: Matriz de Referencia.....	18
Figura 9: Dimensão das chapas para produção dos corpos de prova: a) macrografia e b) arrancamento cruzado. Unidade: mm Fonte: Pesquisa direta (2026).....	18
Figura 10: Ensaio de Arrancamento: a) dispositivo utilizado no teste e b) cinemática do ensaio.....	20
Figura 11: Corpo de prova seccionado	20
Figura 12:a) Variáveis dimensionais da matriz <i>clinch</i> ; b) Variáveis de conformação.....	23
Figura 13: Nervura estrutural	26
Figura 14: Dobramento das chapas	27
Figura 15: Matriz Otimizada Fonte: Pesquisa direta (2026)	28
Figura 16: Matriz <i>clinch</i>	30
Figura 17: Punção do <i>clinch</i>	31
Figura 18: Ruptura da chapa superior.....	32
Figura 19: Região da matriz submetida ao lixamento para correção da altura.....	33
Figura 20: Conjunto da união das chapas.....	35
Figura 21: Resultado da deformação plástica.....	37
Figura 22: Cavidade côncava	37
Figura 23: <i>Interlocking</i> das chapas	37

Figura 24: Comparação do perfil *clinch* na macrografia dos experimentos práticos: a) Deformação Tenório (2017) b) Deformação *clinch* 39

Figura 25: a) Configuração do ensaio de arrancamento b) Força vs deslocamento: ensaio de arrancamento cruzado..... 40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do corpo de prova	19
Tabela 2 - Variáveis e indicadores	22
Tabela 3: Variáveis de controle	25

LISTA DE SIMBOLOS

I: Corrente elétrica [Ampère]

Q: Calor gerado [Joule]

R: Resistência elétrica [Ohm]

t: Tempo [s]

LISTA DE SIGLAS

ABS: Sistema de Freios Antibloqueio

ADAS: Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor

AHSS: Aços avançados de alta resistência

PRF: Polícia Rodoviária Federal

RSW: Soldagem por resistência elétrica a ponto

ZAC: Zona Afetada pelo Calor

ZTA: Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Geral	4
	Desenvolver uma matriz para o processo de união por <i>clinch</i> , com geometria otimizada, a fim de aumentar a rigidez estrutural local das uniões formadas entre chapas metálicas, contribuindo para a melhoria do desempenho mecânico de componentes aplicados em estruturas veiculares.	4
1.3.2	Específicos.....	5
1.4	Estrutura do Trabalho	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Segurança Veicular.....	6
2.1.1	Segurança Veicular Passiva.....	6
2.2	Processo de soldagem.....	7
2.2.1	Soldagem a ponto por resistência elétrica	7
2.3	União por <i>clinch</i>	8
2.3.1	Princípio do Processo	9
2.3.2	Classificação da união por <i>clinch</i>	10
2.3.3	Clinching por cisalhamento	10
2.4	Caracterização Metalográfica	11
2.4.1	Caracterização do processo de união por <i>clinch</i>	11
2.5	Projeto de Matriz	12
2.5.1	Tipos de Matrizes	12
2.5.2	Parâmetros	13
2.6	Tratamento Térmico	14
3	METODOLOGIA.....	15
3.1	Tipo de pesquisa	15
3.2	Materiais e Métodos	16
3.2.1	Matriz do método de união por <i>clinch</i>	17
3.2.2	Corpo de prova	18
3.2.3	Ensaio de Arrancamento Cruzado	19

3.2.4	Macrografia	20
3.3	Variáveis e indicadores.....	21
3.4	Instrumento de coleta de dados	22
3.5	Tabulação de dados	22
3.6	Considerações finais do capítulo	22
4	RESULTADOS	23
4.1	Desenvolvimento da Matriz.....	23
4.2	Produção de corpos de prova com a matriz desenvolvida.....	31
4.3	Ensaio	34
4.4	Macrografia	38
4.5	Ensaio de Arrancamento Cruzado	39
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	42
5.1	Conclusão	42
5.2	Recomendações para trabalhos futuros	43
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	44

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

O Brasil registrou aproximadamente 73.153 acidentes veiculares, representando um aumento de 15% em relação a 2020 (PORTAL DO TRÂNSITO, 2024). O ano de 2024 marcou o maior número de colisões em rodovias federais no país nos últimos anos, ultrapassando os índices registrados nos cinco anos anteriores, conforme dados do Anuário Estatístico da Polícia Rodoviária Federal (PRF).

Atualmente, a segurança veicular concentra-se na resistência a colisões, na prevenção de acidentes, nas habilidades do condutor e na qualidade da construção de rodovias (DU BOIS *et al.*, 2004). Nas últimas décadas, conforme apontado por Du Bois *et al.* (2004), as montadoras adicionaram diversos recursos para auxiliar o motorista a evitar colisões; sendo assim, Schoeneburga (2005) classifica a segurança do carro em: ativa e passiva.

Para De Oliveira e Benevenuto (2019), os sistemas de segurança ativa, objetivam a prevenção da ocorrência de acidentes, atuando de forma a auxiliar o condutor no controle do veículo. Entre esses sistemas, destacam-se o Sistema de Freios Antibloqueio – ABS, os Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor - ADAS, entre outros.

Ademais, Sousa (2018) afirma que a segurança veicular passiva corresponde ao campo da engenharia automotiva dedicada ao desenvolvimento de mecanismos capazes de proteger os ocupantes quando a colisão se torna inevitável, reduzindo a probabilidade e a gravidade das lesões.

Nessa perspectiva, Ruiz *et al.*, (2021) reforçam que a segurança passiva visa preservar e/ou minimizar a integridade física dos passageiros por meio de soluções estruturais que absorvem e dissipam a energia do impacto, sendo essas as colunas de absorção de energia, os cintos de segurança de três pontos e os *airbags* frontais, entre outros, que atuam conjuntamente para mitigar os efeitos do acidente. Alinhando-se a essa lógica de proteção, Du Bois *et al.* (2004) explicam que a própria estrutura veicular desempenha papel fundamental, sendo composta por zonas de deformação progressiva projetadas para absorver parte da energia cinética durante a colisão por meio de deformações plásticas, em suma, os sistemas passivos são responsáveis por minimizar as consequências do impacto.

A estampagem é um processo de conformação metálica utilizado para transformar chapas de metal, sobretudo aço, em peças com formas específicas por meio da aplicação de

força mecânica, sendo amplamente empregado na indústria automobilística na fabricação de componentes como estruturas de carroceria (CONCEIÇÃO, 2022).

Neste aspecto, a carroceria de um veículo automotivo é constituída por aproximadamente 300 componentes obtidos por estampagem de chapas metálicas, os quais são unidos por meio de cerca de 4.000 pontos de solda (SÖDERBERG et al., 2012). Em seu estudo, Sousa (2018) evidencia que, entre esses componentes, a longarina destaca-se como o principal elemento estrutural responsável pela absorção da energia cinética em situações de impacto. Esse componente é geralmente representado como uma viga de seção retangular ou quadrada de parede fina, formada por duas partes unidas por soldagem por resistência elétrica (SOUSA, 2018).

Os veículos atuais são construídos principalmente com chapas de aço estampadas, posteriormente unidas por diferentes técnicas de fixação (ASLANLAR et al., 2008), destacando-se, entre elas, a soldagem por resistência elétrica a ponto (RSW), amplamente empregada na indústria automobilística devido à sua eficiência e à possibilidade de unir chapas metálicas rapidamente (TURETTA, 2016). Entretanto, segundo Rajarajan *et al.* (2022), a aplicação dessa técnica em aços avançados de alta resistência (AHSS) apresenta limitações relevantes, como a formação da Zona Afetada pelo Calor (ZAC), que degrada as propriedades mecânicas locais; o amolecimento dessa região em aços Dual Phase e martensíticos, decorrente do revenimento da martensita; a maior susceptibilidade à formação de trincas, associada às elevadas taxas de resfriamento e tensões residuais; a estreita janela de processo, que demanda controle rigoroso dos parâmetros; a redução da resistência à fadiga, em razão de descontinuidades geométricas e alterações metalúrgicas; e a ocorrência de distorções térmicas, especialmente críticas em estruturas de paredes finas — fatores que, em conjunto, impulsionam o interesse por processos alternativos de união.

Nesse contexto, torna-se necessário o emprego de métodos alternativos de união que preservem as propriedades dos materiais e ampliem a flexibilidade dos processos de fabricação.

Nesse cenário, a união do tipo *clinch* vem se destacando como alternativa na montagem de componentes formados por chapas metálicas. Conforme explicado por Mucha *et al.* (2011), esse tipo de junta é produzido por uma união localizada que prende mecanicamente as chapas, sem a aplicação de calor e sem alterar a estrutura do material. Assim, o *clinch* surge como uma opção complementar à soldagem tradicional, ampliando as possibilidades de montagem na indústria automotiva.

O desempenho mecânico da junta obtida por *clinch* está diretamente relacionado ao projeto geométrico da matriz, uma vez que é da interação entre punção e matriz que resulta o entrosamento mecânico das chapas. Segundo Mucha (2011), parâmetros como profundidade, diâmetro e formato do canal da matriz determinam o escoamento do material durante a conformação, influenciando o *interlock* e o *neck*, grandezas diretamente associadas à resistência final da união.

Portanto, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma matriz *clinch* otimizando o projeto e o processo de união de chapas. Nesse estudo, busca-se aumentar a rigidez em torno do ponto, a fim de melhorar a distribuição de tensões e otimizar o processo de união de chapas. Dessa forma, o presente trabalho tem como ponto de partida o seguinte questionamento:

Como a otimização geométrica da matriz de *clinch*, em comparação às configurações convencionais, contribui para o aumento da rigidez local da junta em uniões de chapas metálicas?

1.2 Justificativa

O desempenho estrutural de componentes críticos, como longarinas veiculares, em situações de fadiga, sobrecarga, deformações dinâmicas (colisão), entre outros, depende do material e da resistência mecânica da união de chapas (DE AVILA, 2017). Nesse contexto, admitindo o material como variável de controle, a escolha do processo de união de chapas (soldagem a ponto, *laser*, etc.) influencia a resposta quanto a solicitações externas (PERONI *et al.*, 2009).

A soldagem a ponto por resistência elétrica – RSW, constitui um dos processos mais empregados na fabricação de carrocerias automotivas (ALZAHOUGI *et al.*, 2023). No processo da soldagem, o autor Bracarense (2000) explica que as peças a serem soldadas são pressionadas uma contra a outra, por meio de eletrodos não consumíveis, fazendo passar por estes uma alta corrente, ocasionada pela lei de Joule ($Q = R \cdot I^2 \cdot t$). Pesquisas mostram que parâmetros como corrente, tempo de soldagem e força do eletrodo exercem influência direta na resistência mecânica da união das chapas (SHOJAEI *et al.*, 2021).

Segundo Rajarajan *et al.* (2022), tais limitações do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica incluem a formação da Zona Afetada pelo Calor (ZAC), que degrada as propriedades mecânicas locais; o amolecimento dessa região em aços Dual Phase e

martensíticos, decorrente do revenimento da martensita; a maior susceptibilidade à formação de trincas, associada às elevadas taxas de resfriamento e às tensões residuais; a estreita janela de processo, que exige controle rigoroso dos parâmetros de soldagem; e a redução da resistência à fadiga e a ocorrência de distorções térmicas, especialmente críticas em estruturas de paredes finas. Corroborando essas observações, Ramazani *et al.* (2016) constataram que a elevada taxa de resfriamento inerente ao processo favorece a formação de microestrutura martensítica frágil na ZAC, resultando em nucleação de trincas na região periférica do botão de solda, enquanto Pouranvari e Marashi (2011) demonstraram que a transição do modo de falha, de arrancamento do ponto para o modo interfacial, mais frágil e de menor absorção de energia, está diretamente relacionada à dureza da ZAC e ao tamanho do ponto de solda.

Em contrapartida, o processo por *clinch* baseia-se na união mecânica de chapas metálicas a frio, realizada pela ação de uma punção que promove a deformação plástica localizada das chapas contra uma matriz (BRANDANI, 2025). Brandani (2025) *apud* Mori *et al.* (2013) destaca que as principais vantagens da união realizada por esse método são: união de materiais dissimilares, abrangendo combinações entre metais e não metais, e menores níveis de distorção, fragilização e tensões residuais.

De acordo com Carvalho *et al.* (2016), a resistência mecânica do método de união *clinch* está relacionada ao encruamento do material, oriundo da deformação plástica localizada nas regiões mais solicitadas da união. Além disso, diferentes estudos reforçam que o *clinch* preserva a microestrutura base das chapas, sem introduzir descontinuidades térmicas significativas. Por exemplo, Friedrich *et al.* (2022) observaram que a microestrutura permanece largamente inalterada após o processo, ao contrário de métodos de união térmica. Essa ausência de zona termicamente afetada, minimiza concentrações de tensão e favorece uma distribuição de esforços mais homogênea na união, contribuindo para um comportamento mecânico mais estável.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Desenvolver uma matriz para o processo de união por *clinch*, com geometria otimizada, a fim de aumentar a rigidez estrutural local das uniões formadas entre chapas metálicas, contribuindo para a melhoria do desempenho mecânico de componentes aplicados em estruturas veiculares.

1.3.2 Específicos

- Realizar o estudo teórico sobre segurança veicular, soldagem a ponto por resistência elétrica, união de chapas pelo método *clinch*, caracterização mecânica de união de chapas, projeto de matriz e tratamento térmico;
- Desenvolver uma matriz a qual não utiliza anel de retenção;
- Produzir nervuras de reforço em torno no ponto de união *clinch*;
- Produzir corpos de prova a partir da união pelo método *clinch*;
- Realizar ensaio não destrutivo (arrancamento);
- Avaliar a resistência mecânica do ponto de união.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho é dividido em 5 capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução do estudo, descrevendo a formulação do problema, a justificativa que evidencia a relevância do tema e as lacunas existentes, além do objetivo geral e dos objetivos específicos, que orientam as etapas necessárias da monografia. Esses elementos compõem a base conceitual que auxilia todo o desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica dos conceitos e teorias a respeito da segurança passiva, soldagem a ponto por resistência elétrica, união de chapas pelo método *clinch*, caracterização mecânica de união de chapas e projeto de matriz.

O capítulo 3 descreve a metodologia do estudo, apresentando os métodos e a abordagem utilizada.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos a partir da união das chapas e caracterização macrográfica, organizando-os de forma clara e objetiva.

O capítulo 5 traz uma conclusão do trabalho, sintetizando os principais achados e relacionando-os aos objetivos propostos no início do trabalho.

Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas que serviram de fundamento teórico e metodológico para o desenvolvimento do estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Segurança Veicular

Por um período do século XX, a aquisição de automóveis foi guiada principalmente por atributos como aparência, potência e status social, ao mesmo tempo que os aspectos ligados à segurança receberam pouca atenção (ROMARO, 2010). Com o decorrer do século, o automóvel tornou-se amplamente difundido e acessível a diferentes grupos sociais, deixando de ser um símbolo de luxo para assumir o papel de bem de uso necessário (WILHELM *et al.*, 2018).

Com o aumento de veículos, os problemas começaram a surgir, como o crescimento de ocorrências de acidentes, congestionamento, condições das estruturas das estradas e preocupações com a prevenção de acidentes e segurança dos passageiros (MIRZAHOSSEIN *et al.*, 2025). Segundo Pereira *et al.*, (2013), esses problemas contribuíram para a alteração do modo de pensar nos veículos, visando à necessidade de implantar sistemas de segurança nos automóveis.

Wilhelm *et al.* (2018) consideram que o sistema de segurança do veículo é classificado em sistemas ativo e passivo. O dispositivo veicular ativo atua na contenção do acidente na sua iminência; sua função é impedir que ocorra o acidente (IKEDA, 2012). Também descrito por Ikeda (2012), os sistemas de segurança passiva atuam no momento da colisão, desempenhando a função de minimizar os impactos físicos e reduzir a probabilidade e a gravidade de lesões aos ocupantes do veículo.

2.1.1 Segurança Veicular Passiva

A segurança veicular passiva compreende quatro grandes subáreas: estrutura (carroceria), *airbag*, biomecânica e componentes internos (GIORIA, 2008). Segundo Sousa (2018), a estrutura se destaca como o elemento essencial, pois constitui a base sobre a qual os demais dispositivos de segurança são integrados, além de suportar cargas estáticas e dinâmicas ao longo da vida útil do veículo. Dessa forma, ela é projetada para preservar sua integridade e garantir a sobrevivência adequada aos ocupantes em caso de colisão (DU BOIS, 2004).

No contexto de estrutura, essa é descrita por “zonas de deformação programadas” (*crumple zones*) — regiões frontais e traseiras dimensionadas para se deformarem de maneira

controlada no evento da colisão, dissipando a energia cinética gerada e reduzindo a desaceleração percebida pelos ocupantes (PEREIRA, 2025).

Segundo Ruiz *et al.* (2005), a união de chapas desempenha um papel fundamental na segurança veicular, pois a integridade estrutural e a capacidade de gerenciamento de energia de um automóvel, dependem diretamente da resistência e da qualidade das juntas. Nesse contexto, parâmetros como o diâmetro dos pontos de solda, a ductilidade dos materiais e a resistência à fadiga são determinantes para o desempenho dessas uniões, pois influenciam sua capacidade de suportar solicitações mecânicas ao longo da vida útil do veículo e de absorver energia em colisões, contribuindo para a preservação da estrutura e para a proteção dos ocupantes (RUIZ *et al.*, 2005).

2.2 Processo de soldagem

Vários setores industriais, com destaque para a indústria automotiva e aeroespacial, utilizam para a união de peças metálicas o processo de soldagem (SOUZA *et al.*, 2017).

Segundo o autor Sousa (2018), há diversos métodos de união empregados na fabricação de estruturas automotivas; entre os mais utilizados estão a soldagem por resistência elétrica a ponto, a soldagem MIG/MAG, a soldagem a laser e a utilização de adesivos estruturais.

A soldagem por resistência elétrica por pontos (RSW) é, de longe, o método de união mais utilizado na indústria automotiva, sendo empregada na montagem de chapas metálicas que formam a estrutura da carroceria dos veículos (CHABOK, 2018).

2.2.1 Soldagem a ponto por resistência elétrica

O princípio de funcionamento da soldagem a ponto por resistência elétrica consiste na passagem da corrente elétrica entre os eletrodos de contato não consumíveis e as chapas que serão unidas (SOUSA, 2018). Essa etapa ocorre pela aplicação de pressão e fluxo de corrente, permitindo a formação da junta (LOPES 2015).

Uma de suas principais vantagens é o baixo custo, a elevada confiabilidade, a alta velocidade de operação e o caráter limpo do processo, características que tornam o RSW uma opção adequada para aplicações de união em larga escala (CHABOK, 2018).

Dessa forma, considerando o princípio básico da soldagem por resistência elétrica por pontos, Chabok (2018) descreve que duas ou mais chapas metálicas sobrepostas são

comprimidas entre um par de eletrodos, através dos quais circula uma corrente elétrica de alta intensidade, gerando aquecimento localizado em razão da resistência elétrica do conjunto. Esse calor promove a fusão controlada do material na região de contato, resultando na formação do ponto de solda que une as chapas (POURANVARI, 2013). Na figura 1 está representado o processo de produção do ponto de solda por resistência elétrica.

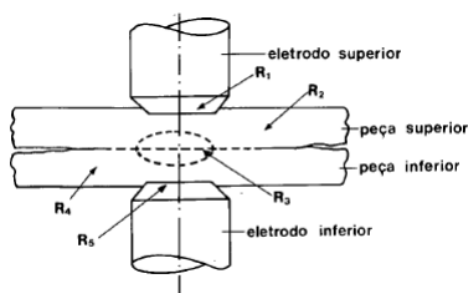


Figura 1: Formação do ponto de solda
Fonte: TURETTA, 2015

A quantidade de calor produzida durante o processo de RSW, resultante tanto da resistência de contato na interface quanto da resistência do material, pode ser expressa da seguinte forma:

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

Onde Q é o calor gerado, I é a corrente de soldagem, R é a resistência total e t o tempo de soldagem. Esses parâmetros podem ser ajustados de forma que o tamanho e a forma desejados do ponto de solda sejam gerados (CHABOK, 2018).

A escolha correta dos parâmetros de soldagem afeta diretamente a resistência mecânica do ponto formado, como explica Zhang (2012). O autor afirma que, quando a força aplicada pelos eletrodos sobre as chapas é excessiva, pode ocorrer a expulsão de material da zona fundida, o que pode ocasionar prejuízos à qualidade metalúrgica da solda. Além disso, destaca que a aplicação de correntes muito elevadas também pode provocar o mesmo fenômeno de expulsão de material, comprometendo o desempenho da junta (ZHANG, 2012).

2.3 União por *clinch*

O método de união pelo *clinch*, também conhecido como união mecânica por compressão (*mechanical press joining*), tem-se tornado mais relevante na indústria em razão da crescente aplicação de materiais dissimilares em estruturas e conjuntos, como alumínio

unido ao aço, alumínio associado a materiais compósitos (incluindo fibras de vidro e de carbono) e aços inoxidáveis, visando à construção leve (MESCHUT *et al.*, 2019).

Gao *et al.* (1994) afirmam que o processo *clinch* destaca-se como uma técnica de união mecânica por conformação a frio localizada, amplamente utilizada devido ao seu baixo custo, versatilidade e aplicação para diversos materiais com diferentes espessuras e geometrias.

2.3.1 Princípio do Processo

O *clinch* é definido como um processo de união de chapas que utiliza a deformação plástica local a frio para travar os materiais conjuntamente (MUCHA, 2011). Segundo Gao (1994), o método de união *clinch* é um dispositivo de travamento automático.

O processo básico envolve a colocação de duas ou mais chapas metálicas sobre uma matriz, enquanto um punção (*punch*) é acionado por unidades hidráulicas ou pneumáticas para penetrar e deformar o metal (TENÓRIO *et al.*, 2017).

A Figura 2 ilustra, de maneira esquemática, o processo de formação da junta entre duas chapas metálicas por meio do método de união *clinch*. Tenório *et al.* (2017) explicam que a união é concretizada quando a camada superior é forçada a se espalhar na camada inferior através de uma folga anular no fundo da matriz, resultando em uma união entre as duas camadas, e, dada a velocidade da ação mecânica, este processo de conformação é classificado como do tipo "extrusão por impacto".

Nesse processo, Mori *et al.*, (2012) afirmam que a dureza da união aumenta devido ao encruamento causado pela grande deformação plástica no momento em que a ferramenta realiza o preenchimento da cavidade da matriz.

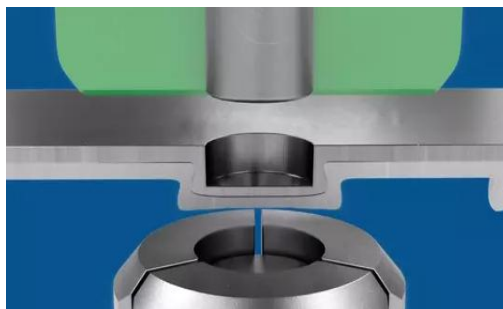


Figura 2: Processo *clinch*
Fonte: Boellhoff, 2026

Sarmento *et al.* (2011) destacam que o processo de união por *clinch* apresenta diversas vantagens, entre elas a ausência de formação de Zona Termicamente Afetada (ZTA), a preservação do revestimento anticorrosivo das chapas, a inexistência de emissões gasosas durante o processo e a melhoria do desempenho em fadiga sob baixos níveis de carregamento. Contudo, os autores também apontam algumas limitações, como o ressalto gerado na região do ponto de união, a dificuldade em conectar mais de duas chapas simultaneamente e a menor capacidade de resistência quando submetido a esforços estáticos.

2.3.2 Classificação da união por *clinch*

A forma de nomear esses tipos de *clinch* muda conforme a aplicação adotada pela empresa que desenvolveu a técnica (GAO *et al.* 1994). Assim, conforme a norma DIN 8593-5, o processo de *clinch* pode ser definido com base no tipo de ferramenta empregada.

2.3.3 Clinching por cisalhamento

Bayer *et al.*, (2022) destacam que, à norma DIN 8593-5 (2003), o *clinch* por cisalhamento se forma a partir da ação conjunta entre o corte e a penetração. Na figura 3, os autores explicam o processo: punção com formato retangular é responsável por realizar o corte da chapa quando submetida a uma carga, e ao mesmo tempo, essa força pressiona o material contra a matriz, causando sua compressão e o consequente escoamento lateral dentro da geometria da ferramenta, o que gera a união.

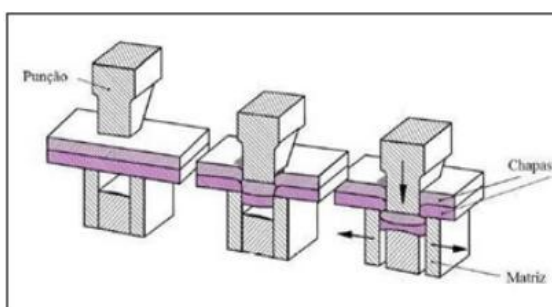


Figura 3: Processo *Clinch*
Fonte: BAYER, 2022

2.3.3.1 Clinching sem cisalhamento

Conforme descrito por Gao *et al.*, (1994), o processo de união por *clinch* sem cisalhamento ocorre em três etapas. Os autores descrevem, como apresentado na Figura 4, as etapas do processo: no primeiro momento, o punção avança e comprime uma chapa contra a outra; no segundo, o punção penetra no conjunto de chapas, deslocando o material para o

interior da cavidade da matriz; e, por fim, na terceira etapa, o material escoar e preencher completamente essa cavidade, resultando na formação do ponto de união.

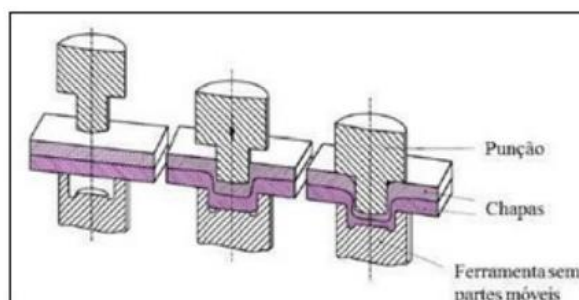


Figura 4: *Clinching* sem cisalhamento
Fonte: BAYER, 2022

Uma limitação desse processo de conformação com matrizes rígidas é que cada combinação de chapas e cada espessura total exigem uma matriz específica, com cavidade e profundidade determinadas, pois a profundidade da matriz é ajustada conforme o volume de material deformado durante o processo (BAYER *et al.*, 2022).

2.4 Caracterização Metalográfica

Metalografia pode ser entendida como a investigação das características estruturais e da composição dos metais e suas ligas, visando estabelecer correlações com suas propriedades físicas, químicas e mecânicas (DE ALMEIDA, 2012). De acordo com o autor, o exame metalográfico constitui um conjunto de procedimentos destinados a associar a estrutura interna do material às suas propriedades físicas, ao processo de fabricação, ao desempenho de suas funções e a outros aspectos relevantes.

A análise macrográfica observa a aparência de uma superfície convenientemente polida e submetida a um ataque químico apropriado, permitindo avaliar a homogeneidade geral do material, a distribuição e a natureza das discontinuidades, a presença de impurezas e as características do processo de fabricação (DE ALMEIDA, 2012).

2.4.1 Caracterização do processo de união por *clinch*

O arrancamento, também chamado de ensaio de tração perpendicular ao plano das chapas, representa uma das solicitações mais críticas para a união por *clinch*, sendo caracterizado pela aplicação de uma carga normal à junção que tende a separar as chapas unidas por meio do descolamento do ponto de conformação, sem envolver esforço de cisalhamento (Tenório *et al.*, 2017).

O ensaio consiste em submeter o ponto de união a esforços mecânicos capazes de provocar sua separação, permitindo a análise do comportamento da união e do modo de falha associado (LOPES, 2015). Conforme ilustrado na Figura 5, observa-se de forma esquemática o procedimento experimental adotado, no qual o corpo de prova é fixado e submetido a uma solicitação mecânica progressiva que induz a deformação das chapas até o completo arrancamento do ponto de solda.



Figura 5: Ensaio de Arrancamento
Fonte: Instron (2026)

2.5 Projeto de Matriz

No processo de união por *clinch*, a matriz constitui um componente de fundamental importância, uma vez que sua geometria, associada à do punção, é determinante para o preenchimento adequado do material e para a formação do travamento mecânico entre as chapas unidas (BASTOS, 2022).

2.5.1 Tipos de Matrizes

As matrizes são classificadas principalmente pela mobilidade de seus componentes, elas são: matrizes rígidas (fixas): não possuem partes móveis e consistem em uma cavidade com um canal intencionalmente desenhado (BASTOS, 2022). Segundo o autor, elas apresentam menor custo de fabricação e favorecem determinados modos de falha estáveis.

As matrizes semirrígidas ou móveis, podem ser bipartidas, tripartidas ou possuir lamelas móveis (OUDJENE, 2008). O autor acredita que essas matrizes são ideais para aplicações automatizadas, pois conseguem acomodar melhor as variações de espessura das chapas vindas do processo de laminação.

Em contrapartida, as matrizes de fundo de plano são utilizadas em um segundo ciclo para remover o ressalto do ponto, permitindo uma superfície plana (BASTOS, 2022).

2.5.2 Parâmetros

Ainda segundo Bastos (2022), o processo de *clinch* envolve a variação de diferentes combinações de parâmetros operacionais, tais como a força de prensagem, a força aplicada pelo prensa-chapas e a configuração geométrica do conjunto punção-matriz, de modo a se obter a máxima eficiência do ancoramento mecânico entre as chapas. Conforme ilustrado na Figura 6, são apresentados os principais parâmetros geométricos utilizados na formação da união por *clinch*, incluindo o diâmetro da matriz, a dimensão final, a região de ancoramento e as dimensões características do pescoço, os quais influenciam a qualidade e a resistência mecânica da união obtida.

Bastos (2022) explica que o diâmetro e a profundidade da matriz determinam o volume de material deslocado durante a conformação, condicionando a formação adequada da região de estricção (pescoço). O ancoramento (a) está diretamente relacionado à resistência ao destacamento, enquanto a dimensão final (d_f) equilibra a resistência ao cisalhamento e a integridade da chapa, evitando a ruptura prematura da região de estricção. A adequada combinação desses parâmetros é, portanto, determinante para a resistência final da união.

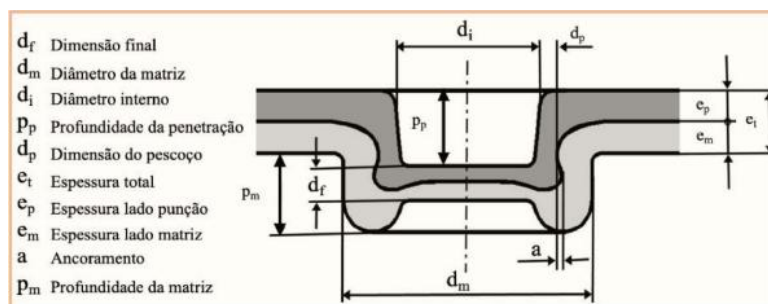


Figura 6: Características geométricas de uma união por *clinch*

Fonte: BASTOS, 2022

2.6 Tratamento Térmico

O tratamento térmico é um processo metalúrgico que consiste em aquecer e resfriar ligas metálicas, ferrosas ou não ferrosas, sob condições controladas, com o objetivo de modificar suas propriedades mecânicas e estruturais. De modo geral, esse processo é conduzido em três fases principais: aquecimento, manutenção da temperatura e resfriamento e pode gerar efeitos como remoção de tensões internas, aumento ou diminuição da dureza, ganho de resistência mecânica, melhoria da ductilidade, da usinabilidade e da resistência ao desgaste e à corrosão (VALE, 2011).

Segundo o autor, dentro do conjunto de tratamentos térmicos, que inclui recozimento, normalização, têmpera e revenimento, a têmpera ocupa lugar de destaque por ser o processo responsável por conferir ao aço sua maior dureza possível. Ela consiste em aquecer a peça acima da chamada zona crítica, temperatura na qual toda a estrutura se transforma em austenita, e em seguida resfriá-la de forma brusca em um meio severo, como água, salmoura ou óleo. Esse resfriamento rápido impede que os átomos de carbono se difundam normalmente pela rede cristalina do ferro, forçando a formação de uma estrutura tetragonal distorcida conhecida como martensita, constituinte responsável pela elevada dureza e resistência mecânica obtidas ao final do processo.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo apresenta-se a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, que será dividida nos seguintes tópicos: tipo de pesquisa, materiais e métodos, variáveis e indicadores, instrumentos de coleta de dados e tabulações de dados.

3.1 Tipo de pesquisa

Segundo Gil (2002), a pesquisa exploratória é utilizada quando há poucos estudos sobre o tema, pois ela permite que o pesquisador se aproxime do problema, compreenda melhor seu contexto e torne-o mais claro, além de ajudar na formulação de hipóteses ou categorias de análise. Já a pesquisa descritiva tem como objetivo apresentar e detalhar as características de um fenômeno ou de uma população, bem como identificar e analisar as relações entre suas variáveis.

No contexto deste estudo, a pesquisa é exploratória, por se tratar de um tema ainda pouco investigado, e descritiva, por buscar caracterizar as propriedades mecânicas do processo de união por *clinch* em chapas.

De acordo com Lakatos e Marconi (1991), a abordagem quantitativa preocupa-se com a mensuração de dados, utilizando técnicas estatísticas para garantir maior precisão nos resultados. Já a abordagem qualitativa busca compreender os fenômenos a partir da interpretação de significados, motivações, valores e atitudes dos participantes.

Quanto à abordagem desse trabalho, trata-se de um tipo quali-quantitativo, de acordo com Creswell (2010), essa abordagem metodológica baseia-se em pressupostos filosóficos e envolve a utilização conjunta de métodos qualitativos e quantitativos, integrando-os em um único estudo. O autor destaca ainda que a principal vantagem desse tipo de investigação está no fato de produzir resultados mais robustos do que aqueles obtidos com a aplicação isolada de cada abordagem. Isso ocorre porque não se trata apenas da presença simultânea dos dois métodos na pesquisa, mas da articulação entre eles de forma complementar e integrada.

Segundo Lakatos e Marconi (1991), a pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros, artigos científicos, dissertações e teses. Essa etapa fundamenta teoricamente o estudo, permitindo a construção do referencial conceitual e a identificação de lacunas na literatura. Vergara (2016) complementa que a pesquisa bibliográfica não se limita à revisão de textos, mas envolve análise crítica das

contribuições teóricas já existentes, servindo de base para a interpretação dos dados empíricos.

A pesquisa experimental, conforme Lakatos e Marconi (1991), caracteriza-se pela manipulação de variáveis sob condições controladas, com o objetivo de observar os efeitos produzidos. Nesse tipo de estudo, o pesquisador interfere na realidade, criando situações específicas para analisar relações de causa e efeito. Gil (2002) ressalta que a experimentação possibilita maior controle sobre as variáveis investigadas, aumentando a confiabilidade dos resultados, especialmente quando associada a instrumentos de mensuração quantitativa e análise qualitativa dos efeitos observados.

Sob essa perspectiva, o presente trabalho configura-se como uma pesquisa de natureza bibliográfica. Caracteriza-se como bibliográfica na medida em que se fundamenta na análise e interpretação de artigos científicos e estudos previamente publicados acerca do tema abordado, permitindo a construção de um embasamento teórico consistente e atualizado.

Paralelamente, este estudo também apresenta caráter experimental e exploratório, pois busca investigar e gerar novos dados sobre a caracterização mecânica do processo de união de chapas por *clinch*, bem como contribuir para a otimização desse processo. Essa abordagem é justificada pelas lacunas existentes na literatura quanto à compreensão detalhada de determinados fenômenos mecânicos e ao aprimoramento da geometria da matriz utilizada na união. Dessa forma, a etapa experimental complementa o referencial teórico, fornecendo evidências que ampliam o entendimento do processo.

3.2 Materiais e Métodos

A Figura 7 apresenta o fluxograma das etapas metodológicas adotadas na pesquisa. O processo inicia-se com o desenvolvimento da matriz otimizada para o processo de união por *clinch* (etapa 1), seguido pela preparação dos corpos de prova de união por *clinch* (etapa 2). Na sequência, realiza-se o processo de caracterização dos corpos de prova (etapa 3) e, posteriormente, a discussão dos resultados (etapa 4).

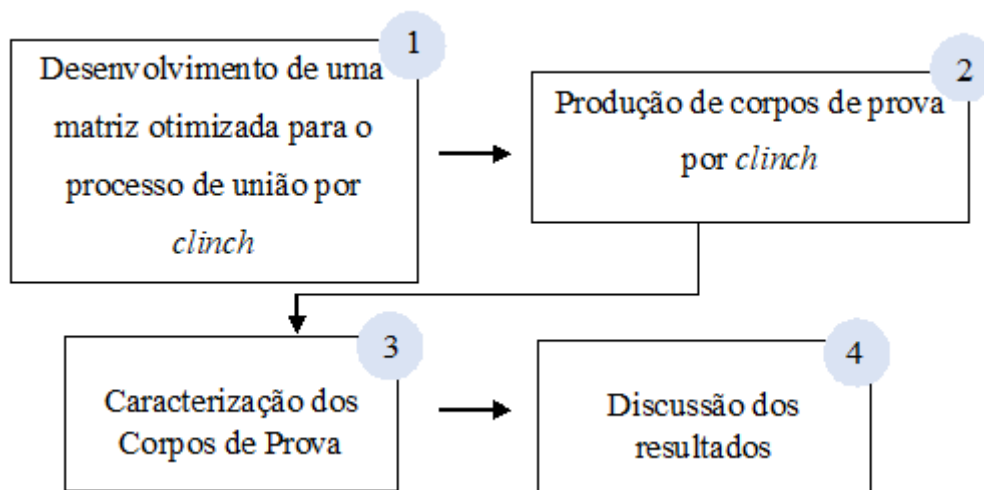


Figura 7: Fluxograma das etapas da metodologia e métodos
 Fonte: Pesquisa direta (2026)

3.2.1 Matriz do método de união por *clinch*

Assim como acontece nos diferentes processos de conformação plástica, a eficiência da união é proveniente da matriz/ferramenta bem projetada e dimensionada. Tenório *et al.* (2017) explicam que mudanças na conicidade e no diâmetro do punção, na espessura do canal e no diâmetro da matriz, na forma e na profundidade prejudicam a espessura de união, o pescoço da junta e a resistência ao arrancamento.

Portanto, as geometrias da matriz e do punção tiveram como base o trabalho de Tenório *et al.* (2017). Essas possuem um canal de circunferência profundo, estreito, com paredes formando um ângulo de 70°, com um diâmetro de Ø10 mm e profundidade de 1,65 mm.

A Figura 8 demonstra o modelo utilizado como referência para o desenvolvimento do presente estudo. Tenório *et al.* (2017), empregaram uma matriz com as dimensões previamente descritas para a realização dos ensaios, a qual é constituída por um anel de retenção. Esse componente tem como função impedir que as extremidades das chapas sofram empenamento ou deslocamento durante o processo de deformação plástica.

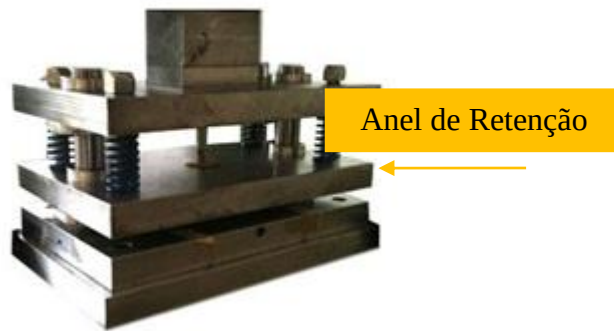


Figura 8: Matriz de Referência
Fonte: Tenório (2017)

3.2.2 Corpo de prova

Os corpos de prova foram produzidos a partir de chapas de aço SAE 1015, com espessura nominal de 0,85 mm. As dimensões das amostras foram definidas conforme apresentado na Figura 9, de modo a permitir a execução dos ensaios mecânicos e das análises macrográficas. Antes da conformação, as superfícies das chapas foram inspecionadas visualmente para verificar a ausência de defeitos superficiais que pudessem interferir na formação da junta.

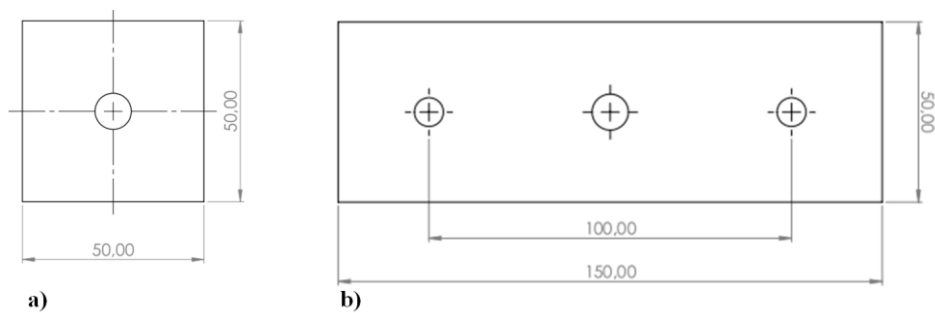


Figura 9: Dimensão das chapas para produção dos corpos de prova: a) macrografia e b) arrancamento cruzado. Unidade: mm
Fonte: Pesquisa direta (2026)

Para cada condição experimental foram produzidos 3 corpos de prova destinados aos ensaios mecânicos e 3 corpos de prova destinados às análises macrográficas. A união das chapas foi realizada por meio de um único ponto de *clinch*, localizado na região central da área de sobreposição, garantindo uniformidade geométrica entre as amostras.

O aço SAE 1015 foi selecionado por ser um aço de baixo teor de carbono amplamente empregado na indústria devido à sua elevada conformabilidade, boa soldabilidade e baixa resistência mecânica. Na forma de chapas, é utilizado na produção de componentes

estampados para a indústria automotiva, como suportes e painéis, na fabricação de gabinetes e componentes de eletrodomésticos da linha branca, além de painéis elétricos, armários, carcaças e demais estruturas metálicas leves destinadas a equipamentos industriais. Essas características tornam o aço SAE 1015 um material amplamente utilizado em processos de conformação mecânica e, conseqüentemente, adequado para estudos envolvendo o processo de *clinch*.

A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas do material empregado na confecção do corpo de prova.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do corpo de prova

Propriedades Mecânicas	Valor
Espessura da chapa	0,85 mm
Resistência à Tração (Limite de Resistência)	385 MPa
Limite de escoamento	285 MPa
Alongamento na Ruptura	37 %
Módulo de Elasticidade	200 GPa
Coeficiente de Poisson	0,29
Módulo de Cisalhamento	80,0 GPa

Fonte: Matweb (2026)

3.2.3 Ensaio de Arrancamento Cruzado

A resistência mecânica das juntas foi determinada por meio do ensaio de arrancamento cruzado (*cross-tension test*), executado em máquina universal de ensaios *Instron*, modelo 8802, equipada com célula de carga de 100 kN, pertencente ao Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais.

Os corpos de prova foram fixados em dispositivo apropriado, de forma que a aplicação da carga ocorresse perpendicularmente ao plano das chapas, solicitando diretamente a região da junta. O carregamento foi aplicado sob controle de deslocamento, utilizando velocidade de 5 mm/min, até a completa ruptura da união.

Durante os ensaios, foram registrados continuamente a força e o deslocamento, permitindo a obtenção da carga máxima suportada pela junta. Após a ruptura, os corpos de prova foram inspecionados para identificação do modo de falha predominante. A Figura 10 ilustra o dispositivo e cinemática do ensaio de arrancamento cruzado.

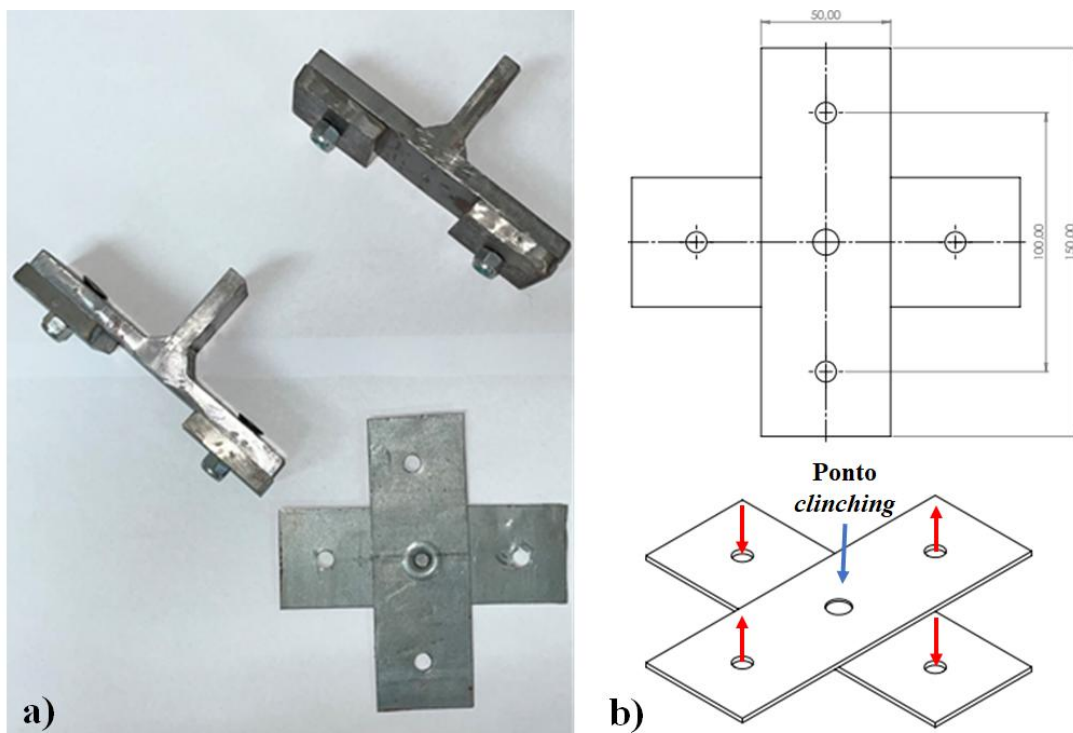


Figura 10: Ensaio de Arrancamento: a) dispositivo utilizado no teste e b) cinemática do ensaio.
Fonte: Pesquisa direta (2026)

3.2.4 Macrografia

A caracterização geométrica das juntas foi realizada por meio de análise macrográfica da seção transversal dos pontos de *clenching*. Inicialmente, os corpos de prova foram seccionados passando pelo eixo de simetria da junta, utilizando um policorte. A Figura 11 ilustra o corte da amostra.



Figura 11: Corpo de prova seccionado
Fonte: Pesquisa direta (2026)

As amostras foram preparadas segundo procedimentos metalográficos convencionais, compreendendo a etapa de lixamento com lixas de granulometria crescente (100 a 800), não sendo necessário ataque químico para revelar a geometria da região conformada.

As macrografias foram obtidas utilizando estereomicroscópio Trinocular disponibilizado pelo Laboratório de Saneamento Básico da Universidade Federal de Ouro Preto. Devido às limitações técnicas, foram realizadas somente análises visuais e comparativas, ou seja, não foram medidos os parâmetros geométricos característicos do processo de *clinch*.

3.3 Variáveis e indicadores

Com o objetivo de identificar e analisar os fatores que influenciam a qualidade das juntas produzidas pelo processo de união por *clinch*, este tópico apresenta as variáveis de controle adotadas na pesquisa e seus respectivos indicadores, os quais foram monitorados ao longo da etapa experimental.

A primeira variável analisada corresponde à matriz, responsável por influenciar diretamente o escoamento do material durante a conformação da junta. Para essa variável, foram definidos como indicadores o diâmetro da matriz, a força de compressão das chapas e a geometria do punção, parâmetros que determinam a deformação imposta ao material. Conforme descrito por *Chen et al.*, (2016), as características geométricas das ferramentas exercem influência significativa na formação da junta e em seu desempenho mecânico.

A segunda variável refere-se ao processo de união por *clinch*, cujo principal indicador adotado foi a deformação plástica durante a conformação das chapas. Esse indicador representa o mecanismo responsável pela formação do intertravamento mecânico entre os materiais, sendo determinante para a integridade da junta e para a sua capacidade de suportar esforços mecânicos. O controle desse parâmetro permite avaliar a eficiência do processo de conformação e sua influência na qualidade da união (*SONG et al.*, 2023).

Por fim, a variável caracterização mecânica dos pontos de união foi avaliada por meio do indicador força de arrancamento, obtido em ensaios mecânicos. Esse indicador foi utilizado para quantificar a resistência das juntas produzidas, permitindo estabelecer a relação entre os parâmetros e o desempenho mecânico alcançado. Dessa forma, a força de arrancamento constitui um dos critérios para a avaliação da eficiência da matriz desenvolvida

e da qualidade das uniões obtidas pelo processo de *clinch*. A Tabela 2 apresenta as variáveis de controle consideradas neste estudo, bem como os indicadores utilizados para sua avaliação.

Tabela 2 - Variáveis e indicadores

Variáveis	Indicadores
Matriz	Diâmetros da matriz, força de compressão das chapas e geometria do punção
Processo de união por <i>clinch</i>	Deformação plástica
Caracterização mecânica nos pontos de união	Força de arrancamento

Fonte: Pesquisa direta (2026)

3.4 Instrumento de coleta de dados

Esta etapa é destinada à obtenção dos dados experimentais necessários ao desenvolvimento da pesquisa, integrando o embasamento teórico, construído a partir da revisão da literatura, com a validação prática por meio de ensaios experimentais. Dessa forma, a coleta de dados é realizada por meio da execução dos processos de fabricação e dos ensaios de caracterização, fornecendo informações que auxiliam a análise e a interpretação dos resultados obtidos.

3.5 Tabulação de dados

Os dados extraídos foram coletados do software de Desenho Assistido por Computador (CAD), *Word* e de planilhas no *Microsoft Excel*.

3.6 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os métodos e as variáveis utilizados no desenvolvimento desse trabalho. Esses elementos estruturam o raciocínio adotado no estudo e garantem clareza e coerência entre os objetivos propostos.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos do desenvolvimento da matriz *clinch*, produção de corpos de prova e ensaios de macrografia e de arrancamento cruzado.

4.1 Desenvolvimento da Matriz

A Figura 12a ilustra as variáveis dimensionais para o desenvolvimento da matriz objeto desse estudo. Tenório (2017) e Wang *et al.* (2014), em seus estudos, sugerem que, a folga e a espessura de fundo devem ser tal que a chapa 1 é forçada na direção da chapa 2 com redução de área, essa conformação é observada na região de intertravamento, conforme ilustrado na figura 12b.

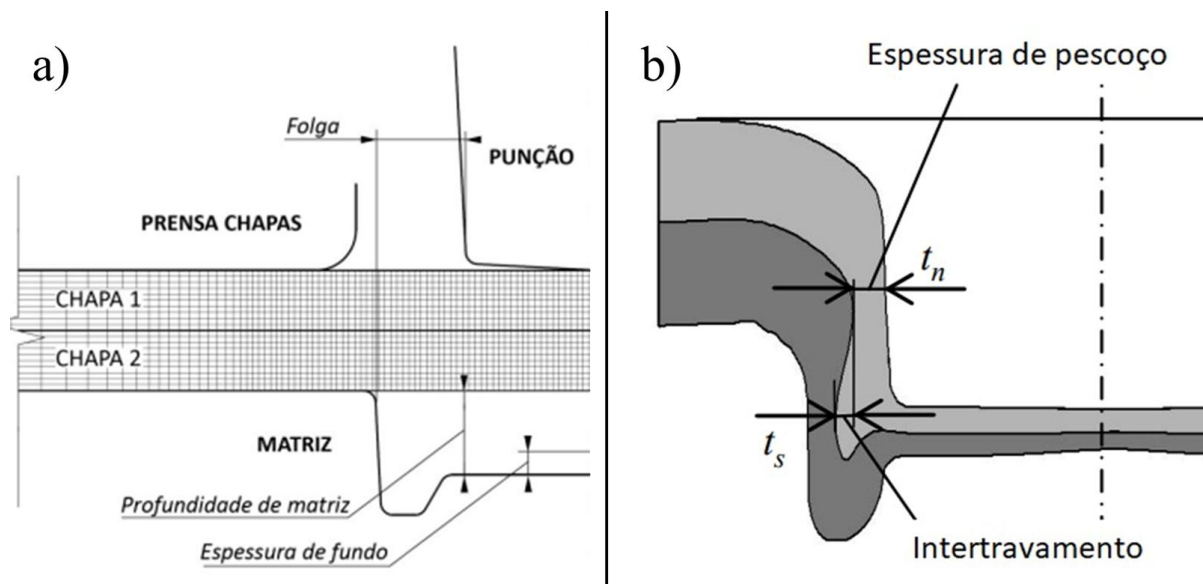


Figura 12:a) Variáveis dimensionais da matriz *clinch*; b) Variáveis de conformação.
Fonte: Adaptado Tenório (2017) e Wang *et al.* (2014)

Nos estudos de Tenório (2017) e Wang *et al.* (2014), a espessura de fundo, folga punção-matriz e profundidade são variáveis que influenciam a resistência mecânica da união das chapas, pois esses parâmetros controlam o escoamento plástico do material e determinam as principais características geométricas da junta: o intertravamento mecânico (*interlock*) e a espessura do pescoço (*neck thickness*). Ademais os autores, afirmam que uma folga excessivamente reduzida ou uma profundidade de matriz (porcentagem em função da espessura de chapas) muito elevada intensificam o afinamento do pescoço, favorecendo a concentração de deformações, a nucleação de trincas e a ruptura prematura por fratura do pescoço formado (*neck fracture*). No entanto, folgas excessivas, matrizes rasas ou espessuras

de fundo elevadas dificultam a formação de um intertravamento adequado, resultando em menor resistência mecânica e em falhas por desprendimento da união das chapas (*button separation*). Além disso, uma espessura de fundo muito reduzida aumenta a probabilidade de perfuração da chapa e de trincas durante a conformação, especialmente em materiais de menor ductilidade.

Varis *et al.*, (2003) demonstraram que o desempenho mecânico da junta depende fundamentalmente do equilíbrio entre a formação de um intertravamento (*interlocking*) suficientemente desenvolvido e a preservação de uma espessura residual do pescoço (*neck thickness*) capaz de suportar os esforços mecânicos. Segundo os autores, esse equilíbrio é ocasionado pela geometria do conjunto punção-matriz, a qual controla o fluxo plástico do material durante a conformação e, conseqüentemente, a geometria final da junta.

Mucha (2011) e Mucha e Witkowski (2014) verificaram que a espessura residual de fundo (*bottom thickness*), usualmente expressa pela redução percentual da espessura total das chapas exerce influência direta sobre a formação do intertravamento e sobre a espessura residual do pescoço, observando que reduções de espessura compreendidas, em geral, entre aproximadamente 60% e 80% proporcionam condições favoráveis para a obtenção de juntas com elevada resistência mecânica.

Lee *et al.* (2010) demonstraram, por meio de simulações numéricas validadas experimentalmente, que o aumento da profundidade da matriz intensifica o escoamento radial do material e favorece a formação do intertravamento, embora reduza progressivamente a espessura residual do pescoço, evidenciando a necessidade de um compromisso entre essas variáveis. Resultados semelhantes foram obtidos por Abe, Mori e Kato (2012), que verificaram que profundidades da matriz equivalentes, em geral, a cerca de 50% a 65% da espessura total das chapas promovem condições favoráveis para o escoamento plástico, desde que compatíveis com a ductilidade do material e com a geometria do punção. De forma complementar, Lambiase e Di Ilio (2013), utilizando o Método dos Elementos Finitos demonstraram que folgas punção-matriz compreendidas, em geral, entre aproximadamente 35% e 50% da espessura de uma chapa favorecem uma distribuição mais uniforme das deformações plásticas, contribuindo simultaneamente para a formação de um intertravamento eficiente e para a preservação da espessura residual do pescoço.

Com base nesses achados, adotou-se neste trabalho uma redução de espessura de 70%, correspondente a uma espessura residual de fundo de 30% da espessura total das chapas, uma folga punção-matriz equivalente a 43% da espessura de uma chapa e uma profundidade de

matriz correspondente a 57,5% da espessura total das chapas. Esses valores encontram-se na faixa percentual sugeridas pela literatura, de modo que, espera-se o favorecimento um fluxo plástico adequado para a espessura e material de chapa selecionados, promovendo o intertravamento e, conseqüentemente, espera-se maximizar a resistência mecânica da junta e reduzir a probabilidade de falhas durante a conformação e em serviço. Assim, na tabela 3, podem ser observados as variáveis de controle selecionadas nesse trabalho.

Tabela 3: Variáveis de controle

Variáveis de Controle	Dimensões (mm)	Redução de área (%)
Espessura de fundo	0,50	70%
Folga punção-matriz por lado	1,30	43%
Profundidade da matriz A	1,65	3%*
Profundidade da matriz B	4,00	57,5%*

*Alongamento (conformação) das chapas

Fonte: Pesquisa direta (2026)

Devido às limitações de fabricação, esse trabalho tem como proposta otimizar o processo de união por *clinch* retirando o anel de retenção convencional (Figura 9) da matriz de conformação, visando simplificar a geometria da ferramenta e reduzir a complexidade construtiva do conjunto. Para compensar a ausência desse componente, foi desenvolvida uma geometria específica para a matriz, de modo que, durante o avanço do punção, as chapas fossem progressivamente confinadas entre a superfície do punção e as paredes da matriz. A partir de um determinado avanço do punção no sentido de conformação, esse confinamento promove o travamento das chapas, restringindo seu deslocamento relativo e proporcionando uma condição de retenção semelhante à desempenhada pelo anel de retenção em ferramentas convencionais. Embora esse mecanismo não reproduza integralmente a ação do anel de retenção, ele exerce parcialmente sua função ao limitar o fluxo descontrolado de material após 50% de intrusão do punção, favorecendo o escoamento das chapas para a cavidade da matriz e contribuindo para a formação do intertravamento mecânico da junta. Dessa forma, a geometria proposta atua simultaneamente como elemento de conformação e de retenção parcial das chapas, esse arranjo possibilitou a união das chapas sem a necessidade da utilização de um anel de retenção.

A solução geométrica da matriz e punção para a remoção do anel de retenção resultou em um reforço estrutural em torno da união de chapas por meio da produção de uma nervura estrutural no formato circular, conforme ilustrado na Figura 13.



Figura 13: Nervura estrutural
Fonte: Pesquisa direta (2026)

Observou-se experimentalmente que a configuração proposta proporcionou um aumento na rigidez das chapas ao redor do ponto de união. Esse arranjo estrutural (nervuras) sugere que a solução apresenta potencial para aplicações em que a rigidez local seja um requisito importante, como apontado por Sousa (2018), o qual observou que o dobramento da chapa entorno de um ponto de solda por resistência elétrica favorece a nucleação e propagação de trincas em estruturas similares a longarinas veiculares submetidas a teste de colisão, devido a um concentrador de tensão. Esse dobramento é ilustrado na Figura 14a, destacado à direita da imagem, e na Figura 14b é possível identificar a ruptura de pontos de solda na imagem à esquerda e, no destaque da imagem à direita, observa-se uma trinca, devido ao dobramento da chapa, que se propaga no entorno do ponto de solda.

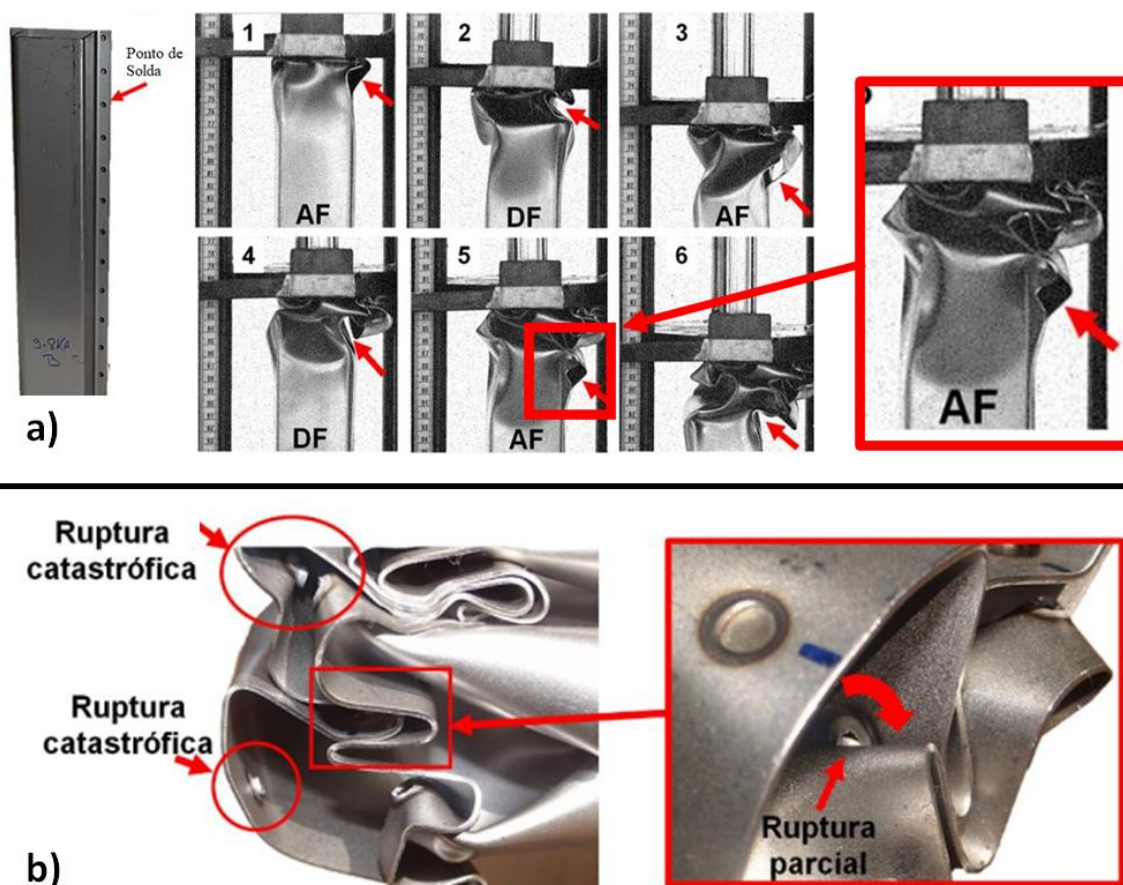


Figura 14: Dobramento das chapas
Fonte: Adaptada Sousa (2018)

Entretanto, neste estudo não foi possível realizar uma caracterização mecânica completa da junta com a realização de ensaios de arrancamento, cisalhamento, torção, fadiga e aplicações mecânicas, por exemplo, testes em estruturas veiculares, porém, foram realizados testes de arrancamento cruzado e análises de macrografia. O ensaio de arrancamento cruzado (*cross-tension test*) é amplamente empregado para determinar a resistência mecânica e identificar os modos de falha predominantes, fornecendo uma medida direta do desempenho mecânico da junta. De forma complementar, a análise macrográfica da seção transversal permite medir parâmetros geométricos fundamentais, como o intertravamento (*interlock*), a espessura residual do pescoço (*neck thickness*) e a espessura residual de fundo (*bottom thickness*), possibilitando correlacionar a geometria da junta com sua resistência mecânica. Segundo Varis (2003), o desempenho das juntas por *clinch*ing está diretamente relacionado ao equilíbrio entre esses parâmetros geométricos, enquanto He (2022) destaca que a associação entre ensaios mecânicos e análises macrográficas constitui uma metodologia indispensável para compreender os mecanismos de formação da junta e otimizar a geometria das ferramentas.

A Figura 15 apresenta a vista geral do conjunto da ferramenta desenvolvido para a execução do processo de *clinch*ing. Dessa forma, foram fabricados uma matriz e um punção em aço SAE 4140, um aço-liga de médio carbono, cuja composição química é caracterizada principalmente pela presença de cromo (Cr), molibdênio (Mo) e manganês (Mn) como elementos de liga. Essa combinação confere ao material elevada temperabilidade, boa resistência mecânica e tenacidade. É um material amplamente utilizado na fabricação de componentes mecânicos submetidos a esforços elevados, como eixos, engrenagens, matrizes, punções e demais elementos estruturais que exigem elevada resistência mecânica.

O sistema é composto pela matriz, pelo punção, pelas guias lineares, pelas molas, pela estrutura fixa de suporte e pelo conjunto móvel. Essa configuração foi concebida para assegurar o correto posicionamento dos componentes, manter o alinhamento entre punção e matriz durante todo o curso de conformação e proporcionar rigidez estrutural suficiente para minimizar deslocamentos indesejados e garantir a repetibilidade do processo. É importante destacar o detalhe C (Figura 15), o qual representa o arranjo de conformação, ou seja, na posição representada da matriz (componente inferior) e do punção (componente superior) há a conformação das chapas, portanto, produção do ponto *clinch*ing. Ainda se destaca, na direita inferior da Figura 16, uma lista dos componentes da matriz, assim como suas respectivas quantidades e materiais.

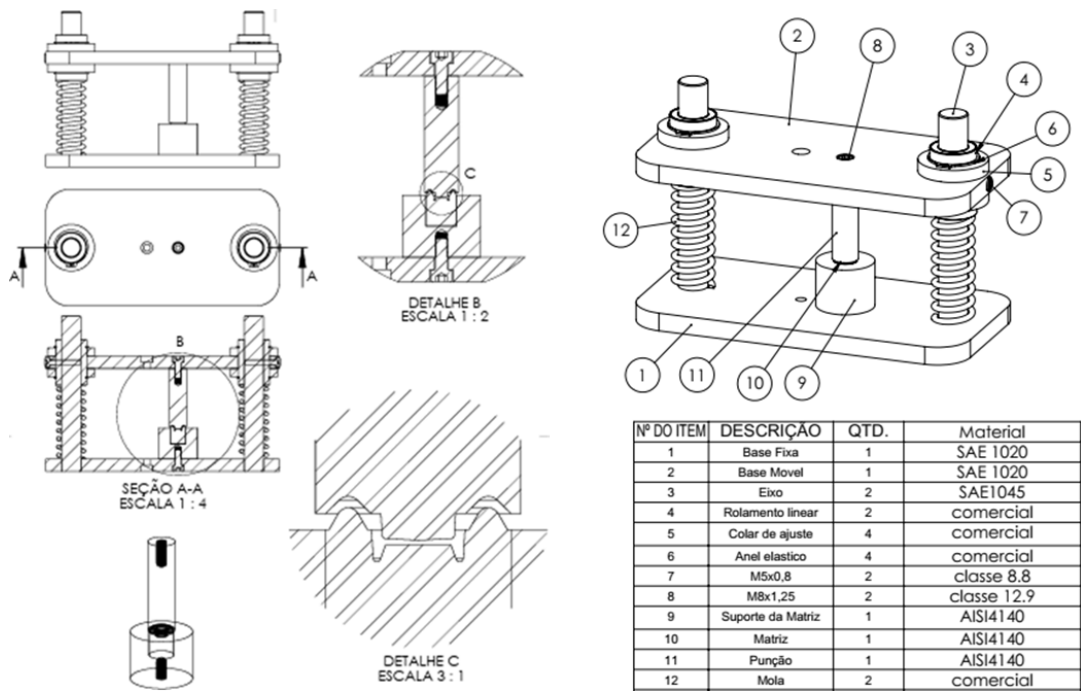


Figura 15: Matriz Otimizada
Fonte: Pesquisa direta (2026)

A Figura 16 apresenta a geometria da matriz desenvolvida para o processo de *clinch*, fabricada em aço AISI 4140. Com o objetivo de aumentar sua dureza e resistência ao desgaste superficial, a matriz foi submetida ao tratamento térmico de têmpera, que consistiu na austenitização do material em temperatura entre 840 °C e 870 °C, seguida de resfriamento rápido em óleo. Esse processo promoveu a formação de uma microestrutura predominantemente martensítica, elevando a resistência ao desgaste e à deformação plástica da ferramenta.

Neste trabalho, no entanto, a etapa de revenimento não foi realizada após a têmpera. Essa opção permitiu preservar a elevada dureza superficial desejada, mas manteve a matriz em uma condição de martensita bruta, caracterizada por baixa tenacidade e pela presença de tensões residuais decorrentes do resfriamento brusco em óleo. Tais características podem comprometer a resistência da ferramenta quando submetida a solicitações cíclicas, como as impostas pelo processo de *clinch* em condições contínuas de operação. Durante os ensaios realizados, não foram observadas trincas macroscópicas nas matrizes, contudo, os testes conduzidos não reproduziram um regime de solicitações cíclicas representativo do uso industrial contínuo, de modo que esse resultado não permite descartar riscos associados à fragilidade da martensita não revenida. Assim, os resultados obtidos não substituem a recomendação metalúrgica consolidada de realização do revenimento após a têmpera, tratamento essencial para aliviar as tensões residuais e aumentar a tenacidade do material.

A matriz constitui um dos principais elementos da ferramenta, sendo responsável por controlar o escoamento plástico do material durante a conformação e, consequentemente, influenciar a formação do intertravamento, da espessura residual do pescoço e da espessura residual de fundo da junta. Ainda, na Figura 16, destaca-se o detalhe B, no qual observa-se um ressalto da matriz representado pela diferença entre a cota B e a cota A que, nesse modelo, foi preestabelecido uma altura de 2,35 mm.

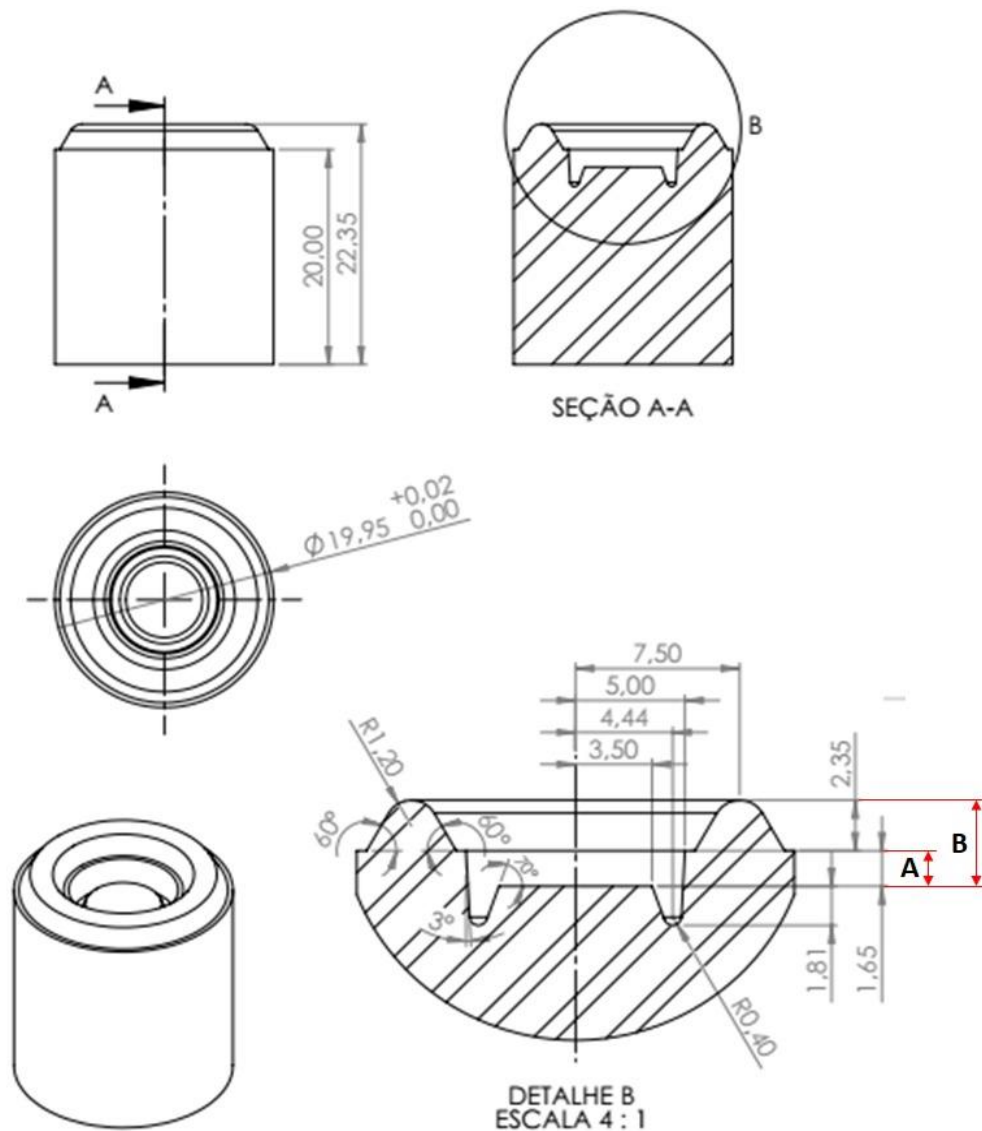


Figura 16: Matriz *clinch*
 Fonte: Pesquisa direta (2026)

A Figura 17 ilustra a geometria do punção empregado no processo de *clinch*. Assim como a matriz, o punção, fabricado em aço AISI 4140, foi submetido ao mesmo tratamento térmico de têmpera sem revenimento para aumentar sua dureza e resistência ao desgaste superficial.

Em conjunto com a matriz, o punção é responsável pela aplicação da carga de conformação e pelo direcionamento do fluxo plástico do material, desempenhando papel fundamental na obtenção da geometria final da junta. Na Figura 17, também, destaca-se o detalhe B, no qual observa-se um rebaixo no entorno do punção medindo 1,87 mm.

Após a inspeção dos corpos de prova e a análise dimensional do conjunto de ferramentas, constatou-se que a geometria da matriz utilizada no processo apresentava divergências em relação às dimensões especificadas no projeto. Verificou-se que a usinagem da matriz não reproduziu fielmente a geometria originalmente projetada, resultando em alterações na região responsável pelo escoamento do material durante a conformação.

Essas diferenças geométricas comprometeram o escoamento plástico da chapa para o interior da cavidade da matriz, modificando a distribuição de tensões ao longo da região deformada. Como consequência, gerou um concentrador de tensão na chapa 1 (Figura 12a), promovendo o início da fratura antes que o material pudesse fluir adequadamente e formar o intertravamento mecânico característico do processo de *clinch*ing. Dessa forma, a ruptura ocorreu em uma etapa anterior à formação completa da junta, impossibilitando a obtenção de uniões com integridade estrutural.

A Figura 18 apresenta o aspecto típico observado nos corpos de prova após os ensaios, evidenciando a ruptura da chapa superior provocada pela usinagem inadequada da matriz. Esse resultado confirmou que a falha estava diretamente relacionada às dimensões incorretas da ferramenta, tornando necessária a correção da geometria da matriz antes da continuidade dos ensaios experimentais.

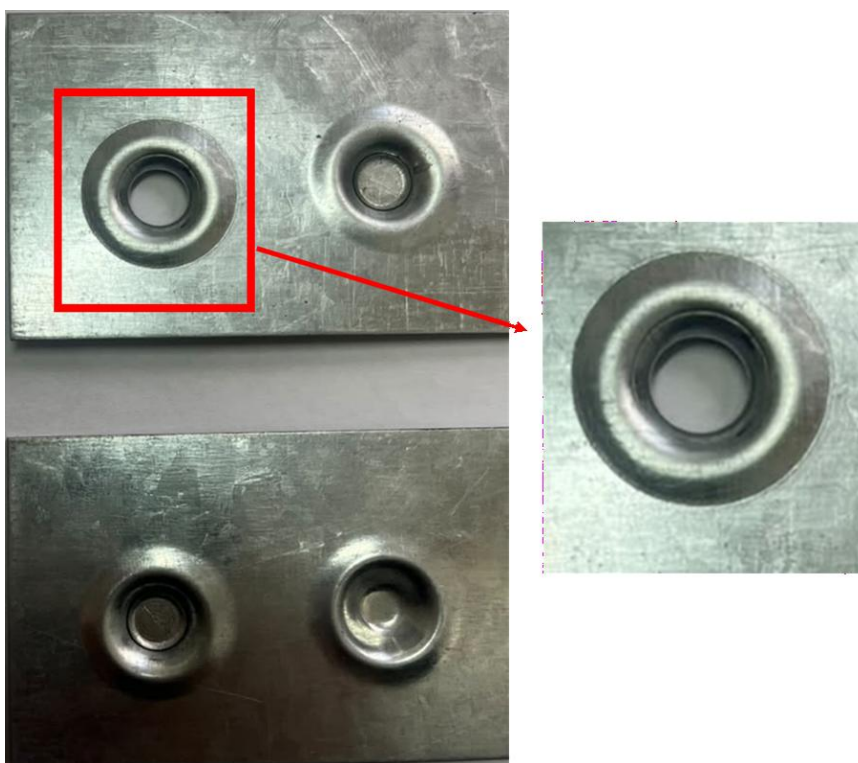


Figura 18: Ruptura da chapa superior
Fonte: Pesquisa direta (2026)

Dentre os erros dimensionais relacionados ao processo de fabricação por usinagem, os mais críticos, que ocasionaram os concentrações de tensões, foram a ausência dos ângulos dimensionados para o punção (Figura 17) e a ausência do ângulo de entrada da matriz, além disso, observou-se que a profundidade da matriz estava maior em 0,95mm, ou seja, onde se lê na Figura 16 a cota de 1,65 mm (detalhe B), na matriz fabricada a dimensão medida foi de 2,65mm. Após a identificação das divergências dimensionais entre o projeto e a matriz fabricada, ações corretivas foram realizadas na tentativa de se obter o resultado esperado, a produção de um ponto *clinch* sem a necessidade de um anel de retenção e, consequentemente, o aumento da rigidez no entorno do mesmo. Para isso, foi realizada uma operação de retificação por lixamento na matriz (Figura 19, imagem a esquerda/superior), reduzindo a altura do ressalto de 2,35 mm, (dimensão destacada na Figura 16, detalhe B, marcação em vermelho) para 1,50 mm. Essa intervenção (retifica) teve como objetivo corrigir a usinagem da ferramenta, na tentativa de eliminar a condição que estava comprometendo a conformação da junta.

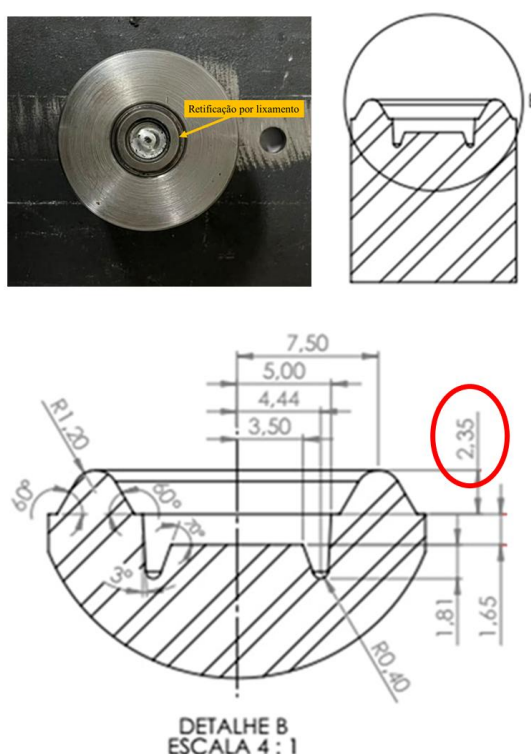


Figura 19: Região da matriz submetida ao lixamento para correção da altura
Fonte: Pesquisa direta (2026)

A redução da altura da matriz alterou diretamente a profundidade de conformação imposta ao conjunto punção–chapas–matriz durante o processo de *clinch*. Com o maior avanço do punção em relação a profundidade da matriz, as chapas tiveram uma deformação próxima da condições desejada de escoamento plástico, permitindo que o material fluísse de

forma mais uniforme para o interior da cavidade da matriz. Dessa forma, houve uma redistribuição mais homogênea das tensões na região de conformação, reduzindo os concentradores tensões no pescoço da união das chapas, porém, ensaios preliminares, após ajuste dimensional da matriz, apontaram que a conformação das chapas para a produção do ponto *clinch* foi insuficiente, visto que, a aplicação de uma baixa força no sentido separação das chapas, aproximadamente 100 N (esforça manual), foi o suficiente para o desprendimento das mesmas, ou seja, a conformação plástica para união das juntas foi insuficiente para a formação do intertravamento mecânico. Portanto, apesar da redução da espessura de fundo das chapas, essa ação não foi suficiente para um intertravamento robusto, logo, novos ajustes foram feitos, o principal foi a adição de disco de 6mm de diâmetro da mesma chapa utilizada para a união.

Após todos esses ajustes, novas amostras foram produzidas não sendo mais observada a ocorrência da ruptura da chapa superior durante a etapa de conformação e, tão pouco, baixa resistência da união das chapas.

4.3 Ensaio

A Figura 20 apresenta o conjunto experimental empregado nos ensaios de união por *clinch*, constituído por um punção e uma matriz montados em uma prensa hidráulica. O punção foi instalado na parte superior do equipamento, responsável por transmitir a força de conformação às chapas, enquanto a matriz permaneceu fixada na base inferior, fornecendo o suporte necessário para o escoamento do material e a formação da junta mecânica.

Entre o punção e a matriz foram posicionadas duas chapas de aço SAE 1015 sobrepostas, material selecionado devido à sua elevada ductilidade e à sua baixa resistência mecânica, características que favorecem a deformação plástica durante o processo de *clinch*. Durante a aplicação da carga, o punção desloca as chapas em direção à cavidade da matriz, promovendo o escoamento plástico do material. Esse escoamento resulta na formação do intertravamento mecânico entre as chapas, sem a necessidade de elementos de fixação ou da aplicação de calor.

A configuração apresentada na Figura 20 assegura o correto alinhamento entre o punção, as chapas e a matriz, condição indispensável para que a carga seja aplicada de forma axial e uniforme. Esse alinhamento minimiza a ocorrência de esforços assimétricos e garante

que a deformação ocorra conforme previsto, contribuindo para a repetibilidade dos ensaios e para a obtenção de juntas com geometria consistente.

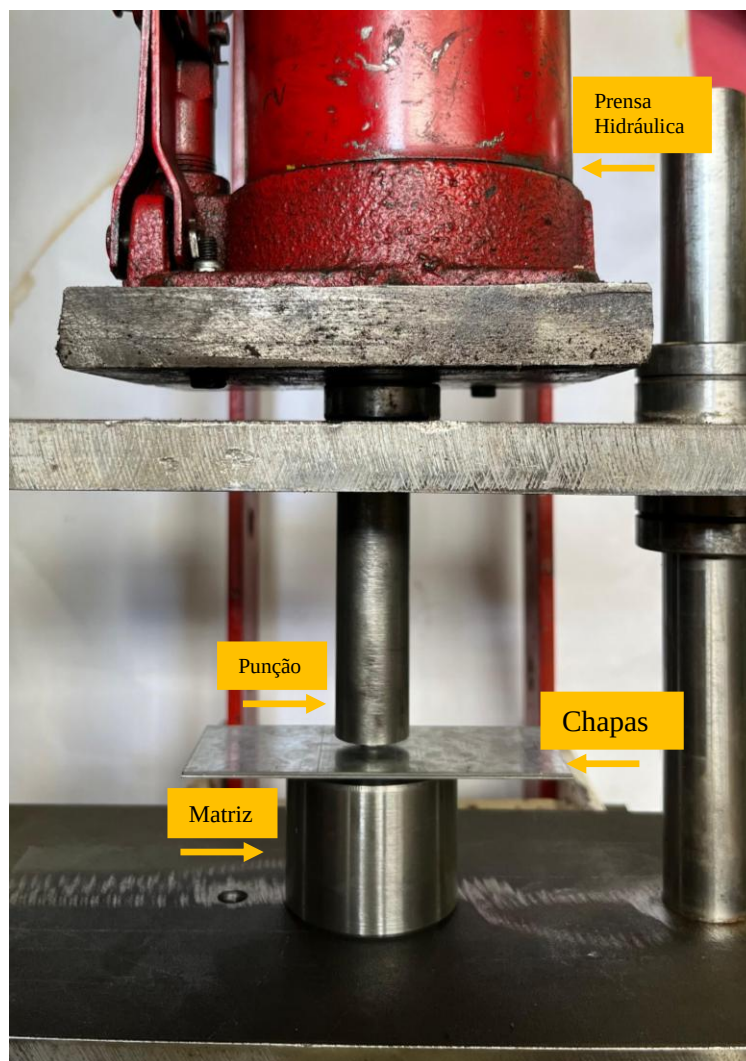


Figura 20: Conjunto da união das chapas
Fonte: Pesquisa direta (2026)

Com o conjunto de ferramentas devidamente montado e alinhado, conforme ilustrado na Figura 20, foi aplicada uma força normal de 50 kN por meio da prensa hidráulica. Essa força foi transmitida pelo punção às chapas sobrepostas, promovendo a deformação plástica do material e gerando as tensões necessárias para a realização da união por *clinch*ing. Durante o deslocamento do punção em direção à matriz, o material das chapas escoou para o interior da cavidade da matriz, dando origem à geometria característica da junta e possibilitando a formação do intertravamento mecânico entre as chapas.

As Figuras 21, 22 e 23 apresentam as juntas obtidas após a adequação da geometria da matriz. Observa-se a formação de uma cavidade côncava bem definida (Figura 22), resultante

da ação compressiva exercida pelo punção durante a conformação. Essa cavidade evidencia que o material foi deformado de maneira controlada, promovendo seu deslocamento para a região lateral e inferior da matriz sem a ocorrência de falhas.

Além disso, verifica-se a formação do *interlocking* (encravamento mecânico), caracterizado pelo travamento do material na região inferior da junta (Figura 23). Esse intertravamento é o principal responsável pela resistência mecânica da união, uma vez que impede a separação das chapas na direção normal ao plano de união. A presença de um *interlocking* contínuo e bem definido indica que o material apresentou escoamento plástico suficiente para preencher a cavidade da matriz e estabelecer a retenção mecânica entre as chapas.

Além da cavidade côncava e do *interlocking*, observa-se na Figura 21 a formação de uma nervura ao redor do ponto de união, originada pelo escoamento plástico do material durante a etapa de conformação. Essa nervura é formada em razão da compressão exercida pelo punção, que promove o deslocamento do material tanto para o interior da cavidade da matriz quanto radialmente ao redor da região conformada. Como resultado, ocorre um enrijecimento local da chapa, decorrente da alteração de sua geometria e do aumento do momento de inércia da seção nessa região.

Do ponto de vista estrutural, a presença dessa nervura pode representar uma característica benéfica, uma vez que contribui para o aumento da rigidez local da junta, reduzindo a suscetibilidade a deformações na vizinhança do ponto de união. Esse arranjo estrutural apresenta potencial para aplicações em que o aumento da rigidez localizada seja um requisito de projeto, especialmente em componentes sujeitos a carregamentos mecânicos ou impactos.

De modo geral, a geometria final (Figura 22) obtida demonstra que a modificação realizada na matriz restabeleceu as condições adequadas de conformação do processo de *clinch*. A ausência de ruptura da chapa superior, aliada à formação de uma cavidade uniforme e de um *interlocking* bem desenvolvido, confirma a eficiência da correção da ferramenta e evidencia que a união foi produzida com integridade estrutural, diferentemente do observado nos ensaios preliminares.



Figura 21: Resultado da deformação plástica
Fonte: Pesquisa direta (2026)



Figura 22: Cavidade côncava
Fonte: Pesquisa direta (2026)

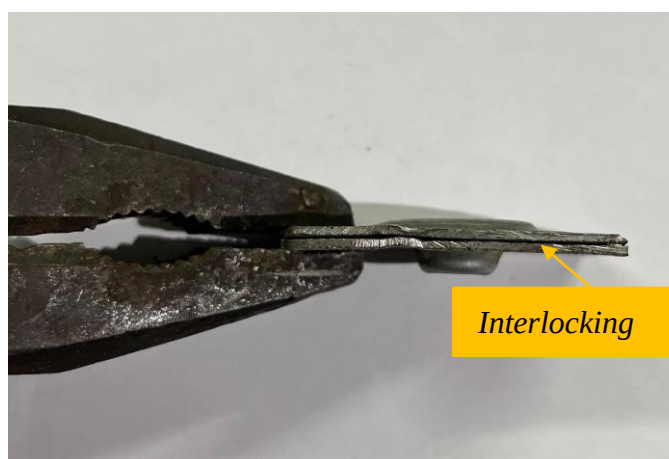


Figura 23: *Interlocking* das chapas
Fonte: Pesquisa direta

4.4 Macrografia

A caracterização macroscópica das juntas foi realizada com o objetivo de avaliar a geometria interna formada durante o processo de *clinch* e verificar a qualidade da união mecânica obtida. A análise da seção transversal permite identificar aspectos fundamentais da junta, como o comportamento do escoamento plástico do material, a formação do *interlocking* (travamento mecânico), a espessura do pescoço da junta (*neck thickness*), a interface entre as chapas e a presença de eventuais descontinuidades, como trincas, vazios ou separações, que possam comprometer o desempenho mecânico da união.

Para essa avaliação, as amostras foram seccionadas transversalmente, preparadas metalograficamente e analisadas por meio de um estereoscópio, possibilitando a visualização da geometria interna da junta formada após a conformação. Essa análise permitiu verificar se o material apresentou escoamento plástico suficiente para preencher adequadamente a cavidade da matriz e formar o intertravamento mecânico característico do processo de *clinch*.

A Figura 24 apresenta um comparativo entre a macrografia da junta obtida por Tenório (2017) e a junta produzida no presente trabalho. A comparação evidencia que a geometria da união obtida é compatível com aquela reportada na literatura, apresentando características típicas de uma junta por *clinch* formada adequadamente. Em ambas as amostras, observa-se o escoamento do material em direção à região inferior da junta, promovendo o travamento mecânico entre as chapas sem a ocorrência de ruptura ou separação na interface de união.

Na junta produzida neste trabalho, verifica-se a formação de um *interlocking* contínuo e definido, indicando que o material escoou de maneira adequada durante a conformação e foi capaz de estabelecer a retenção mecânica necessária para impedir a separação das chapas. Além disso, não foram observadas descontinuidades significativas, como trincas ou vazios na região de conformação, evidenciando que a correção da geometria da matriz proporcionou condições adequadas para o processo de união.

A semelhança entre a geometria da junta obtida experimentalmente e aquela apresentada por Tenório (2017) reforça que os parâmetros adotados no presente estudo, aliados à adequação da geometria da ferramenta, foram capazes de produzir uniões com características geométricas compatíveis com aquelas consideradas satisfatórias na literatura. Dessa forma, a análise macroscópica confirma que o processo de *clinch* promoveu uma

deformação plástica controlada do material, resultando na formação de uma junta íntegra e com potencial para apresentar bom desempenho mecânico.

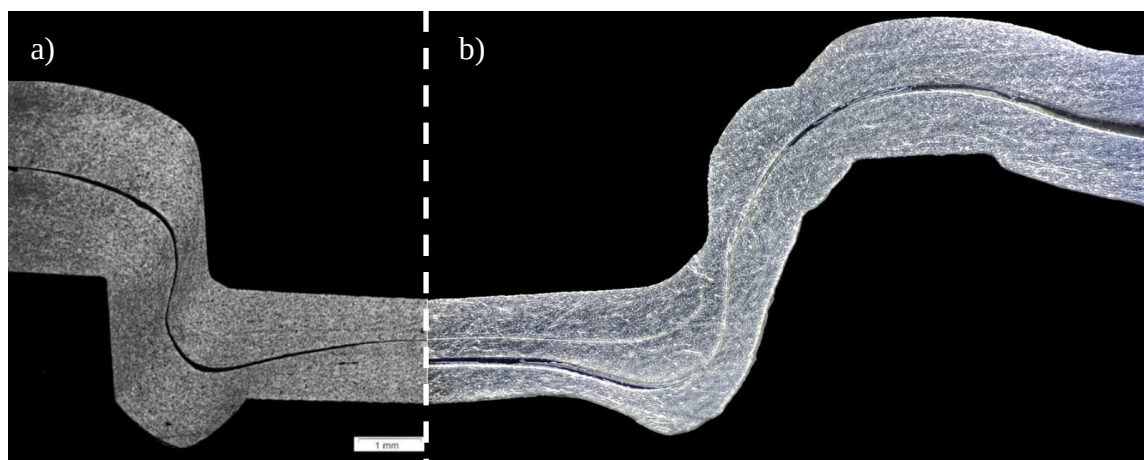


Figura 24: Comparação do perfil *clinch* na macrografia dos experimentos práticos: a) Deformação Tenório (2017) b) Deformação *clinch*

Fonte: Adaptado Tenório (2017) e Pesquisa direta (2026)

4.5 Ensaio de Arrancamento Cruzado

O objetivo desse ensaio é quantificar a capacidade da junta de suportar carregamentos de tração até a ocorrência da falha, permitindo determinar a carga máxima suportada, analisar o comportamento mecânico durante o carregamento e identificar o mecanismo de ruptura predominante. Tenório (2017) utilizou desse ensaio como uma importante ferramenta para avaliar a eficiência da união obtida pelo processo de *clinch*

De acordo com Lee *et al.* (2017), no caso específico das juntas produzidas por *clinch*, o ensaio de tração arrancamento cruzado assume grande relevância por avaliar diretamente a capacidade a resistência mecânica das chapas unidas quando submetidas a solicitações de separação. De acordo com os autores, a resistência desse tipo de união depende exclusivamente da deformação plástica induzida durante a conformação, a resposta da junta ao carregamento fornece informações sobre a qualidade da geometria formada,

A Figura 25a apresenta a montagem experimental utilizada para a realização do ensaio, conforme descrito na Seção 3.2.3 apresenta nesse trabalho. Os corpos de prova cruciformes foram posicionados em dispositivos de fixação específicos acoplados à máquina universal de ensaios *Instron*, garantindo o correto alinhamento da junta em relação ao eixo de aplicação da carga.

Os resultados de força vs deslocamento obtidos no ensaio podem ser observados na Figura 25b.

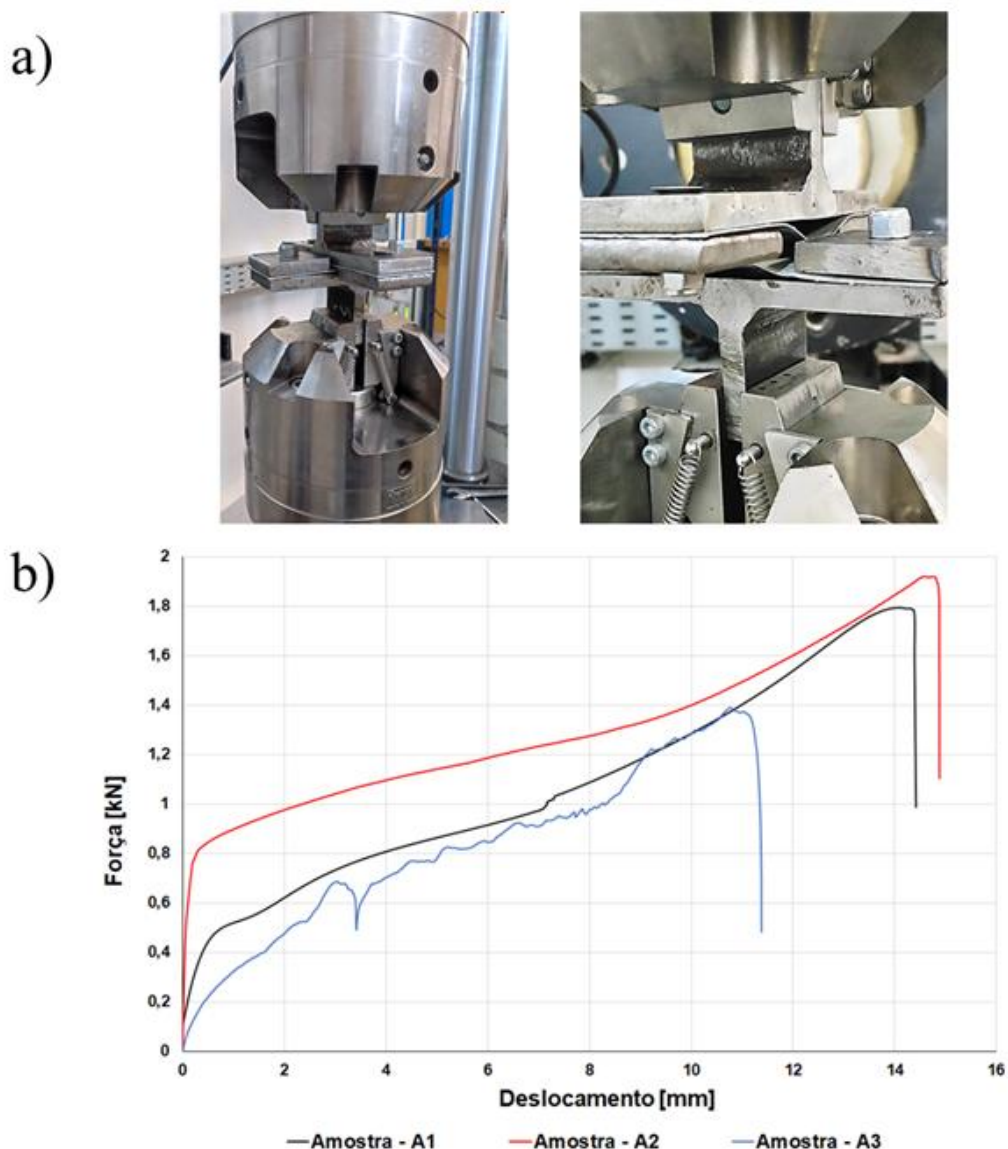


Figura 25: a) Configuração do ensaio de arrancamento b) Força vs deslocamento: ensaio de arrancamento cruzado.

Fonte: Pesquisa direta (2026)

O comportamento das curvas força vs deslocamento obtidas no ensaio de arrancamento cruzado das amostras A1, A2 e A3 está em concordância com o observado para juntas aço-aço produzidas por clinching. As três amostras apresentam aumento progressivo da carga até um pico seguido de queda abrupta, característica típica da ruptura do pescoço (*neck fracture*) ou da perda do intertravamento após elevada deformação plástica, mecanismo amplamente descritos por Varis *et al.*, (2003) para juntas de aço de alta resistência. Além disso, as cargas máximas obtidas, entre aproximadamente 1,4 e 1,9 kN, encontram-se na mesma ordem de grandeza reportada por Abe, Mori e Kato (2014) para juntas de chapas de aço submetidas aos ensaios de arrancamento cruzado, nas quais a resistência variou em

função da geometria da junta e da resistência do material, mantendo comportamento semelhante ao observado neste trabalho.

Entre as amostras analisadas, a A2 apresentou a maior carga máxima e o maior deslocamento até a ruptura, indicando maior capacidade de absorção de energia, seguida pela A1, enquanto a A3 apresentou ruptura prematura e menor capacidade resistente. Esse comportamento é consistente com os resultados de Mucha e Witkowski (2014), que demonstraram que pequenas alterações na geometria da junta, especialmente no intertravamento e na espessura residual de fundo, provocam diferenças significativas tanto na carga máxima quanto no formato das curvas força-deslocamento, mesmo quando o processo é realizado com a mesma tecnologia de união.

Embora as amostras tenham sido produzidas utilizando a mesma matriz, a dispersão observada é compatível com o comportamento normalmente reportado para juntas de *clinch*ing. Segundo Varis *et al.*, (2003), pequenas variações no escoamento plástico durante a conformação podem produzir diferenças mensuráveis na geometria final da junta, principalmente na espessura do pescoço, no intertravamento e na espessura residual de fundo, mesmo quando a geometria da ferramenta permanece inalterada. Essas variações decorrem de fatores inerentes ao processo, como diferenças locais nas propriedades mecânicas da chapa, variações dimensionais do material, atrito entre ferramenta e chapa, alinhamento do ferramental e repetibilidade da prensa durante a conformação.

Essa interpretação também é sustentada por Mucha e Witkowski (2014), que avaliou a repetibilidade de juntas produzidas nas mesmas condições de fabricação e verificou dispersão estatística tanto na força de conformação quanto na força de ruptura, recomendando que a qualidade da junta seja analisada por meio de médias e desvios experimentais, e não por valores individuais. Assim, a diferença de aproximadamente 0,5 kN entre as amostras A2 e A3 não indica, necessariamente, alteração no processo de fabricação, mas está dentro da variabilidade inerente ao processo de *clinch*ing.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

A revisão da base teórica sobre segurança veicular, processos de soldagem por resistência elétrica, união por *clinch*, caracterização metalográfica e projeto de matrizes mostrou-se relevante para embasar a interpretação dos resultados obtidos neste estudo. A metodologia experimental envolveu o desenvolvimento de uma matriz e de um punção em aço SAE 4140, com geometria projetada a partir dos parâmetros de folga, profundidade e espessura de fundo indicados na literatura, além da produção de corpos de prova em chapas de aço SAE 1015 e da realização de ensaios de arrancamento cruzado e de análise macrográfica.

Os resultados sugerem que a proposta de remoção do anel de retenção convencional foi viável, ainda que a da matriz fabricada tenha apresentado divergências dimensionais em relação ao projeto, como a ausência dos ângulos previstos para o punção e uma profundidade de matriz cerca de 0,95 mm superior à especificada, o que ocasionou a ruptura da chapa superior nos ensaios preliminares. A geometria obtida após a intervenção sugere uma penetração satisfatória do punção e um encravamento suficiente do material, gerando uma região de retenção mecânica que assegura a fixação permanente entre as chapas.

A formação de uma nervura estrutural ao redor do ponto de união indica um possível ganho de rigidez local nas chapas conformadas, decorrente do escoamento radial do material durante o processo.

Os ensaios de arrancamento cruzado indicam cargas máximas entre 1,4 kN e 1,9 kN, valores que se aproximam da ordem de grandeza reportada por outros autores para juntas de características semelhantes. O comportamento das curvas força vs deslocamento, marcado por um aumento progressivo seguido de queda brusca, também se mostrou coerente com os mecanismos de ruptura por fratura do pescoço ou perda do intertravamento descritos na literatura.

A análise macrográfica evidenciou a formação de cavidade côncava e de *interlocking* entre as chapas, com geometria aproximada à reportada por Tenório (2017). Essa comparação, todavia, foi predominantemente visual, já que não foram medidos parâmetros geométricos característicos do processo, como a espessura do pescoço e a espessura residual de fundo, o que limita conclusões mais precisas da geometria otimizada para a resistência da união.

Considera-se que este trabalho se aproximou do objetivo geral proposto, bem como dos objetivos específicos relacionados ao desenvolvimento de uma matriz sem anel de retenção, à produção de nervuras de reforço e à caracterização mecânica das uniões. Nesse sentido, os resultados indicam que a otimização da geometria da matriz, associada à remoção do anel de retenção, apresenta potencial para contribuir com o aumento da rigidez local das juntas formadas. Ainda assim, estudos complementares mostram-se necessários para avaliar quantitativamente esses efeitos e para validar, de forma mais robusta, a viabilidade da solução proposta.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

A partir da análise e discussão dos resultados apresentados neste trabalho, foram identificadas oportunidades para a continuidade da pesquisa, destacando-se as seguintes propostas:

- Avaliação da resistência mecânica de uniões por *clinch* em função dos parâmetros geométricos da matriz;
- Influência da sequência de aplicação das forças de prensagem e de penetração na qualidade e na resistência da união por *clinch*;
- Como o processo de união por *clinch* influencia a resistência mecânica em estruturas semelhantes a longarinas;
- Caracterização mecânica de uniões por *clinch* sob esforços de cisalhamento, torção e fadiga.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABE, Y.; MORI, K.; KATO, T. **Mechanism of mechanical clinching of high-strength steel sheets**. *Journal of Materials Processing Technology*, Amsterdam, v. 212, n. 4, p. 884–889, 2012.
- ALZAHOUGI, Abdulkarim; DEMIR, Bilge; ELITAS, Muhammed. An Optimization Study on Resistance Spot Welding of DP600 Sheet Steel via Experiment and Statistical Analysis. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 13, n. 4, p. 11106-11111, 2023.
- ASLANLAR, S. et al. Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding. **Materials & Design**, v. 29, n. 7, p. 1427-1431, 2008.
- BASTOS, Vanderlei Martins. **O clinching e a solda a ponto em aço avançado bifásico de 1,3 GPa de resistência mecânica**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.
- BAYER, Gabriela Luiza Gomes et al. **Estudo comparativo entre o processo de união de chapas por clinching e rebitagem convencional**. 2022.
- BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Processo de soldagem por resistência. **Curso de Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.
- CARVALHO, A. J. S.; VERNEY, J. C. K. PROJETO E EXECUÇÃO DE FERRAMENTA PARA UNIÃO POR CONFORMAÇÃO DE CHAPAS A FRIO, “CLINCH”, 2016.
- CHABOK, Ali. Resistance spot welding of advanced high strength steels. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 23, n. 8, p. 649-658, 2018.
- CHEN, Chao et al. Mechanical properties of the two-steps clinched joint with a clinch-rivet. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 237, p. 361-370, 2016.7
- CONCEIÇÃO, Isabella Carolina et al. Os discursos sobre a indústria 4.0 no setor de estampagem da indústria automobilística: uma revisão sistemática da literatura. **Revista de Casos e Consultoria**, v. 13, n. 1, 2022.
- OLIVEIRA, Nathan Nunes de; BENEVENUTTI, Valdésio. O comportamento do consumidor brasileiro de automóveis: uma análise comparativa entre dois veículos voltada ao quesito segurança. 2019.
- DE ALMEIDA BATISTA, Ederson (Org.). **Caracterização de amostra metalográfica**. 2012. 7 slides. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/slideshow/caracterizacao-de-amostra-metalografica/15581234>. Acesso em: 21 jun. 2026.
- DO VALE, Alan Rafael Menezes. Tratamento térmico. Belém: Instituto Federal de Educação. **Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA)**, 2011.
- DU BOIS, Paul et al. Vehicle crashworthiness and occupant protection. **Automotive Applications Committee, American Iron and Steel Institute, Southfield, Michigan**, 2004.

FRIEDRICH, Sandra et al. Numerical and experimental investigation of flat-clinch joint strength. **Production Engineering**, v. 16, n. 2, p. 275-284, 2022.

GAO, Shiming; BUDDE, Lothar. Mechanism of mechanical press joining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 34, n. 5, p. 641-657, 1994.

GIL, Antonio Carlos et al. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

GIORIA, Gustavo dos Santos. **Influência da utilização do ABS na segurança veicular baseada na eficiência de frenagem e na probabilidade de travamento de roda**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

HE, Yulin et al. **Evaluation of shear and peel strength of Al1060 single-lap and T-lap joints produced by rotated clinching process with twin rotating punches**. *Materials*, v. 15, n. 12, p. 4237, 2022.

IKEDA, T. Segurança Veicular Dispositivos de Segurança Passiva-Descrição e Recomendações. **Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia Automotiva)–Escola de Engenharia Mauá, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia**, v. 74, 2012.

LAMBIASE, F.; DI ILIO, A. **Finite element analysis of material flow in mechanical clinching with extensible dies**. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Warrendale, v. 22, n. 6, p. 1629–1636, 2013.

LEE, C.-J.; KIM, J.-Y.; LEE, S.-K.; KO, D.-C.; KIM, B.-M. **Design of mechanical clinching tools for joining of aluminium alloy sheets**. *Materials & Design*, Oxford, v. 31, n. 4, p. 1854–1861, 2010.

LEE, Chan-Joo et al. **Analysis of failure-mode dependent joint strength in hole clinching from the aspects of geometrical interlocking parameters**. *Metals*, v. 8, n. 12, p. 1020, 2018.

LOPES, Diego Meireles. **Avaliação de parâmetros do processo de soldagem a ponto por resistência para a união de chapas de aço “interstitial free”(IF)**. 2015. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. Fundamentos de metodologia científica. rev. e ampl. **São Paulo: Atlas**, 1991.

MESCHUT, Gerson et al. Joining Technologies for the Production of Hybrid Components. **Lightweight Design worldwide**, v. 12, n. 3, p. 50-57, 2019.

MIRZAHOSSEIN, Hamid; NOBAKHT, Pedram; JIN, Xia. Uncovering traffic fluctuations and their impact on accidents in Tehran’s major highways. **Computational Urban Science**, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2025.

MUCHA, Jacek; KAŠČÁK, L.; SPIŠÁK, E. Joining the car-body sheets using clinching process with various thickness and mechanical property arrangements. **Archives of civil and mechanical engineering**, v. 11, n. 1, p. 135-148, 2011.

MUCHA, J. **The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint**. *Materials & Design*, Oxford, v. 32, n. 10, p. 4943–4954, 2011.

MUCHA, J.; WITKOWSKI, W. **The clinching joints strength analysis in the aspects of changes in the forming technology and load conditions**. *Thin-Walled Structures*, Oxford, v. 82, p. 55–66, 2014.

OUDJENE, Mourad; BEN-AYED, Lanouar. Parametrical study of clinch joining using the Taguchi method. **Engineering Structures**, v. 30, n. 6, p. 1782-1788, 2008.

PERONI, Lorenzo; AVALLE, Massimiliano; BELINGARDI, Giovanni. Comparison of the energy absorption capability of crash boxes assembled by spot-weld and continuous joining techniques. **International journal of impact engineering**, v. 36, n. 3, p. 498-511, 2009.

POURANVARI, Marashi; MARASHI, S. P. H. Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties. **Science and Technology of welding and joining**, v. 18, n. 5, p. 361-403, 2013.

RAJARAJAN, Chakkaravarthi et al. Resistance spot welding of advanced high strength steel for fabrication of thin-walled automotive structural frames. *Forces in Mechanics*, v. 7, p. 100084, 2022.

ROMARO, M. Abraçado pela segurança. **Revista CESVI Brasil**, São Paulo, v. 13, n. 68, p. 26-28, abr./mai. 2010.

RUIZ, Douglas Criado; BATALHA, Gilmar Ferreira. Estudo de um critério de modo de falha para solda a ponto por resistência. *Escola Politécnica da USP*, n. 2, 2005.

SARMENTO, Alisson Alves. **União de chapas de aço por conformação a frio: análise da resistência mecânica sob carga multiaxial**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SHOJAEI, Mohammad et al. Mechanical properties and failure behavior of resistance spot welded third-generation advanced high strength steels. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 65, p. 364-372, 2021.

SÖDERBERG, Rikard et al. The influence of spot weld position variation on geometrical quality. **CIRP annals**, v. 61, n. 1, p. 13-16, 2012.

SONG, Chunyu; LEI, Lei; YAN, Ming. Clinched joining mechanical performance in multiple states. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 129, n. 9, p. 3799-3812, 2023.

TENÓRIO, Márcio Bradani et al. Estudo do processo de união de chapas por clinching. In: **Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. ABCM, Joinville. 2017.

VARIS, J. P.; LEPISTÖ, J. **A simple testing-based procedure and simulation of the clinching process using finite element analysis for establishing clinching parameters.** *Thin-Walled Structures*, Oxford, v. 41, n. 8, p. 691–709, 2003.

VERGARA, Sylvia Constant. Projetos e relatórios de pesquisa. **São Paulo: Atlas**, v. 34, p. 38, 2006.

WILHELM, Fernanda; GARCIA, Ricardo Letizia. Equipamentos de segurança veicular: análise da legislação brasileira. **Revista Teste SPGG**, v. 4, n. 2, p. 283-298, 2018.

ZHANG, Hongyan; SENKARA, Jacek. **Resistance welding: fundamentals and applications.** CRC press, 2011.